



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA LANTTA  
AUTOMAATIO LINJAN VIRTUAALIKÄYTTÖÖNOTTO

Diplomityö

Tarkastaja: prof. Seppo Tikkanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty:  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 8. kesäkuuta  
2016

## TIIVISTELMÄ

**JUHA LANTTA:** Automaatiolinjan virtuaalikäyttöönotto

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 56 sivua, 6 liitesivua

Elokuu 2016

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneautomaatio

Tarkastaja: professori Seppo Tikkanen

**Avainsanat:** virtuaalinen käyttöönotto, simulaatio, simulaatioavusteinen suunnittelu, automaatiosuunnittelu

Virtuaalisia käyttöönottoja on toteutettu etenkin Saksassa autoteollisuudessa jo pidemmän aikaa. Tuotantolinjat, joissa tuotanto on pidettävä kustannussyistä mahdollisimman suurella käyttöasteella käynnissä, ovat suurimpia hyötyjiä virtuaalisista käyttöönotoista. Suurimmat kustannukset syntyvät, mikäli käyttöönoton aikana ilmenee jotain odottamatonta, johtaen muutoksiin lopullisessa toteutuksessa. Muutokset globaalissa bisneksessä pakottavat yritykset tuottamaan tuotteita entistä nopeammalla tahdilla, jolloin virheitä syntyy väkisinkin. Virtuaalisilla malleilla ja erilaisilla niihin liittyvillä konsepteilla pyritään vähentämään epäselvyyksiä suunnitteluprojektin sisällä. Virtuaalinen käyttöönotto on yksi näistä konsepteista.

Suunnitteluprojektin kriittinen vaihe kustannusten kannalta on projektin alku, jossa määritetään mitä suunniteltavalta laitteistolta vaaditaan. Toinen tärkeä vaihe on käyttöönotto, jossa todellinen toiminta päästään toteamaan. Mahdolliset virheet havaitaan usein vasta tällöin, kun toimintaa on mahdollista testata. Virheiden aiheuttamat kustannukset kertautuvat suhteessa siihen, mitä myöhemmin ne havaitaan. Tästä syystä on siis oleellista kehittää suunnitteluprojektin alkuvaiheita siten, että mahdolliset virheet havaittaisiin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

Simulaatioiden avulla pyritään tuottamaan enemmän informaatiota etenkin suunnittelun alkuvaiheisiin, joissa todellisen laitteiston hahmottaminen voi olla vaikeata. Ongelmaksi muodostuu simulaatioiden toteuttamiseen käytetty työmäärä suhteessa muuhun projektiin käytettyyn työmäärään. Simulaatioita käytettäessä niiden aiheuttamien kustannusten tulisi olla selkeästi pienemmät kuin niiden avulla tuotetut tuotot ja saavutetut säästöt.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia virtuaalisen käyttöönoton toteuttamista osana suunnitteluprojektia. Diplomityössä toteutettiin tutkimus aiemmin tehdyistä virtuaalisen käyttöönoton projekteista, sekä käytännössä virtuaalinen käyttöönotto erääseen asiakasprojektiin. Työssä tutkittiin virtuaalisen käyttöönoton avulla saavutettavia hyötyjä etenkin automaatiosuunnittelun näkökulmasta, sillä Etteplan Oyj:n intressinä oli kehittää omaa suunnittelutoimintaansa.

## ABSTRACT

**JUHA LANTTA:** Virtual commissioning of an automation line

Master of Science Thesis, 56 pages, 6 Appendix pages

August 2016

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Machine Automation

Examiner: Professor Seppo Tikkanen

**Keywords:** virtual commissioning, simulation, simulation supported engineering, automation engineering

Virtual commissionings have been implemented for a longer period of time already, especially in German automotive industry. Manufacturing lines, in which the production has to be maintained and secured with as high utilization rate as possible, gain the most out of virtual commissioning projects. The largest unexpected expenses arise if a problem appears during the commissioning, leading to changes within the final implementation. Transformations within the global business environment are forcing the companies to produce products at even quicker pace, leading to unavoidable mistakes and errors. Utilizing virtual models and related concepts engineering companies are attempting to decrease the amount of misunderstandings and confusion within the engineering project. Virtual commissioning is one of these concepts.

The most critical phase of a design and engineering project, especially cost-wise, is the beginning of the project. During which all the requirements for the product are defined. The other significant phase is the commissioning, where the actual operation or functionality is found out. Possible errors are often detected this late during the project, when the actual functions of the product can be seen and tested. The affects and costs of the errors are multiplied when compared to earlier detection, and the later the detection happens the larger the effects are. Because of this reason it is crucial to develop the earlier phases of the engineering process in such a way that all these errors could be found as early as possible.

Simulations are one way to produce additional information during the first steps of engineering projects when the outlines of the product functionalities are difficult to understand. The problem using simulations is the additional work load required to implementing the simulations as a bonus compared with the normal work load for the rest of the project. When using simulation as an additional part of the engineering project all the costs need to be clearly less than the savings and the profits gained.

The objective of this research was to study the implementation of the virtual commissioning software and principles as a part of engineering project. The research was done utilizing previous virtual commissioning projects and by implementing these principles to one ongoing customer project. The main benefits studied were concerning the perspective of an automation engineer's work, as it was an Etteplan Oyj's interest to develop the work flow and load of its automation engineers.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteenä diplomi-insinöörin tutkintoa varten ja toteutettu Etteplan Oyj:lle osana heidän asiakasprojektiaan. Tutkimuksen tarkoituksena oli toteuttaa kyseiseen projektiin virtuaalinen käyttöönotto hyödyntäen Ideal Product Data Oy:n tarjoamaa ohjelmistoa. Työ on toteutettu kevään ja kesän 2016 aikana. TTY:n puolelta työn tarkastajana on toiminut professori Seppo Tikkanen, kiitokset hänelle panoksestaan.

Haluan kiittää Etteplan Oyj:tä tämän työn mahdollistamisesta ja mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta. Erityiskiitokset etenkin ohjaajanani toimineelle Timo Hietikolle sekä Iiro Aallolle työn toteutuksen mahdollistamisesta. Haluan kiittää teknisestä tuesta useita Ideal Product Data Oy:n työntekijöitä, jotka auttoivat matkan varrella ilmenneiden ongelmien kanssa. Haluan kiittää lisäksi perhettäni, puolisoani sekä ystäviäni opiskeluideni tukemisesta.

Vantaalla, 16.9.2016

Juha Lantta

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Työn tavoitteet.....	1
1.2	Etteplan Oyj.....	2
2.	TEOLLISUUS 4.0 JA DIGITALISAATIO.....	3
2.1	Virtuaalinen todellisuus ja ympäristö.....	3
2.1.1	Virtuaalinen tuote ja simulointi.....	4
2.2	Teollisuus 4.0 ja digitaalinen tehdas .....	5
2.3	Virtuaalinen kaksonen.....	7
3.	SUUNNITTELUPROSESSI.....	10
3.1	Suunnitteluprosessi ja käyttöönotto .....	10
3.2	Simulointi osana suunnittelua .....	14
3.2.1	Hardware- ja Software-in-the-loop simulointi.....	15
3.2.2	Virtuaalisen käyttöönoton erityispiirteet.....	16
4.	TUOTTEEN ELINKAAREN HALLINTA.....	20
4.1	Elinkaaren ja elinkaarihallinnan vaiheet .....	20
4.2	Elinkaarihallinnan hyödyt .....	22
4.3	Virtuaalinen käyttöönotto osana tuotteen elinkaarihallintaa.....	23
4.3.1	Rinnakkaissuunnittelu .....	25
4.3.2	Virtuaalinen käyttöönotto ja simulaatioavusteinen suunnittelu .....	26
5.	MALLINNUS- JA SIMULOINTIYMPÄRISTÖ .....	29
5.1	Mallinnusohjelmistot suunnittelussa .....	29
5.1.1	Siemens NX .....	30
5.2	Mechatronics Concept Designer-laajennus .....	31
5.2.1	Yhteys ohjaavaan automaatiojärjestelmään .....	33
5.2.2	Simulointityökalut ja toiminnallisuudet.....	36
6.	PROJEKTIN TOTEUTUS - CASE MCD .....	42
6.1	Etteplan Oyj ja virtuaalinen käyttöönotto .....	42
6.2	Projektin esittely.....	43
6.3	Virtuaalisen käyttöönoton työnkulku .....	44
6.4	Mitä saavutettiin? .....	45
6.4.1	Havainnot ja tulokset .....	45
6.4.2	Muutokset suunnittelutyöhön.....	48
6.4.3	Tulevaisuuden toimenpiteet .....	50
7.	YHTEENVETO .....	52
	LÄHTEET .....	53

LIITE A: Mechatronics Concept Design workflow

LIITE B: Ote Etteplan Oyj:n suunnitteluprojektiohjeistuksesta

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.</i>	<i>Eri teknologioita kasvavan informaatiomäärän käsittelyyn [9] .....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 2.</i>	<i>Virtuaalisen kaksosen tuottama informaatio tuotannon eri vaiheissa [11] .....</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 3.</i>	<i>Eräs malli perinteisen suunnitteluprosessin ja käyttöönoton kulusta [13].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 4.</i>	<i>Havaitun virheen korjauksesta aiheutuvat kustannukset projektivaiheittain [9] .....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 5.</i>	<i>Projektin eri suunnitteluvaiheissa havaittuja virhelähteitä [12] .....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 6.</i>	<i>Simulaation hyödyntäminen suunnittelussa [11] .....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 7.</i>	<i>Vaihdos todellisen ja virtuaalisen käyttöönotto-kohteen välillä [9] .....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 8.</i>	<i>Elinkaarihallinnan vaikutus tuotteen elinkaareen [3] .....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 9.</i>	<i>Suunnitteluprojektin vaiheistus eri toimijoiden välillä [23] .....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 10.</i>	<i>Rinnakkaissuunnittelun menettelytavan hyötyjä [23] .....</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 11.</i>	<i>Prototyyppien vähentämisen tuottamia säästöjä [15].....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 12.</i>	<i>Virtuaalisen käyttöönoton ja suunnitteluyhteistyön hyödyt [13].....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 13.</i>	<i>Tietoperustaisen suunnittelun työkalujen sijoittuminen eri projektivaiheisiin [28] .....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 14.</i>	<i>Tyypillinen OPC-palvelimien ja -asiakkaiden käyttötapa [35] .....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 15.</i>	<i>OPC DA-palvelimen komponentit [34] .....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 16.</i>	<i>Mechatronics Concept Designer-lisäosan yläpalkin työkaluja.....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 17.</i>	<i>Saranaliitoksen määrittäminen Mechatronics Concept Designer:ssä.....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 18.</i>	<i>Antureiden määrittämiseen käytettävä Collision sensor-työkalu.....</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 19.</i>	<i>OPC-kommunikaation liian lyhyestä päivitysajasta ilmestynvä virheilmoitus .....</i>	<i>41</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AR	engl. Augmented Reality, lisätty todellisuus, virtuaalisia ja todellisia objekteja yhdistävä todellisuus
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAE	engl. Computer Aided Engineering, tietokoneavusteinen tekniikka
CAM	engl. Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CE	engl. Concurrent Engineering, rinnakkaissuunnittelu
CIM	engl. Computer Integrated Manufacturing, tietokoneintegroitu tuotanto
COM	engl. Component Object Model, ohjelmistokomponenttien luomiseen tarkoitettu menetelmä
DA	engl. Design Automation, toistuvan mallin ja valmistuksen suunnittelun automatisointiin käytettävä työkalu
DCOM	engl. Distributed Component Object Model, hajautettuun verkkoympäristöön kehitetty COM:n päivitys, ks. COM
DCS	engl. Distributed Control System, hajautettu prosessin tai laitoksen ohjausjärjestelmä
DMU	engl. Digital Mockup Unit, suunnittelun alkuvaiheessa tuotettu digitaalinen kopio tai prototyyppi tuotteesta
ERP	engl. Enterprise Resource Planning, yrityksen resurssien hallintaan käytettävä järjestelmä
FAT	engl. Factory Acceptance Test, testi, jossa ohjausjärjestelmän ja ohjelmiston toiminta testataan toimintamäärittelyjä vastaavaksi
FEM	engl. Finite Element Method, numeerinen laskentatapa, jolla approksimoidaan tuloksia raja-arvo ongelmiin ja osittaisdifferentiaaliyhtälöihin jakamalla mallinnettu kappale pieniin elementteihin ja yhdistämällä näiden elementtien tuloksia suuremmaksi kokonaisuudeksi
HIL	engl. Hardware-in-the-Loop, simulointitapa, jossa jokin todellinen osa-alue liitetään osaksi simuloitua mallia
HMI	engl. Human-Machine Interface, käyttäjän ja laitteen ohjausjärjestelmän välinen käyttöliittymä
KBE	engl. Knowledge-Based Engineering, tietoperustainen suunnittelu
MCD	engl. Mechatronics Concept Designer, Siemens NX-mallinnusohjelmiston lisäosa suunnittelukonseptien testaamiseen
MES	engl. Manufacturing Execution System, materiaali- ja tuotevirtojen seurantaan sekä dokumentointiin käytettävä järjestelmä
OLE	engl. Object Linking and Embedding, Microsoftin omistava teknologia, jolla mahdollistetaan objektien upotus ja linkittäminen dokumentteihin ja muihin objekteihin
OPC	engl. OLE for Process Control, teollisuuden yhteentoimivuus standardi alustariippumattomaan tiedonsiirtoon, akronyymi viittaa alkuperäiseen Windows-pohjaiseen standardiin, ks. OLE
OPC DA	engl. OPC Data Access, OPC-spesifikaatio reaaliaikaiseen datasiirtoon, ks. OPC
OPC UA	engl. OPC Unified Architecture, palvelukeskeisen arkkitehtuurin OPC-spesifikaatio, ks. OPC
PLC	engl. Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka
PLM	engl. Product Lifecycle Management, tuotteen elinkaaren hallinta

SAT	engl. Site Acceptance Test, ks. FAT, testi toteutetaan lopullisessa tuotantotilassa
SCADA	engl. Supervisory Control And Data Acquisition, tietokannan sisältävä automaatiojärjestelmän valvomo-ohjelmisto
SHM	engl. Shared Memory, muistitila, joka on samanaikaisesti usean ohjelman dataliikenteen käytettävissä
SIL	engl. Software-in-the-Loop, simulointitapa, jossa sekä ohjausjärjestelmän puoli, että fyysinen laitteisto on simuloitu vrt. HIL
SIT	engl. Site Integration Test, ennen käyttöönottoa tai osana käyttöönottoa toteutettava testi, jolla varmistetaan osajärjestelmien toiminta toistensa kanssa
UI	engl. User Interface, käyttöliittymä



# 1. JOHDANTO

Globaalin valmistavan teollisuuden tilanne ja vaatimukset ajavat yritykset kehittämään tuotteitaan entistä nopeammin ja tehokkaammin. Tämän lisäksi tuotteilta vaaditaan monipuolisempia ominaisuuksia. Kilpailijan parempaan hintaan tai suorituskykyyn on pystyttävä vastaamaan, jolloin on oltava innovatiivisempi, kehitettävä parempia tuotteita nopeammin ja pienemmillä kustannuksilla. Asiakkaiden levittäytyessä myös tuotteen valmistajan on oltava useammassa paikassa ja ymmärrettävä eri asiakassegmenttien erilaiset vaatimukset tuotteelta. Tuotteiden muuttuessa monimutkaisemmiksi niihin sisältyvä informaatiomäärä kasvaa, joka on pystyttävä hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Tämän tuotetun informaation avulla luodaan lisäarvoa sekä tuotteen valmistajalle, että käyttäjälle.

Tuotettu informaatio ja teknologioiden kehittyminen luovat mahdollisuuksia ottaa käyttöön uusia toimintatapoja, joilla pyritään kehittämään suunnittelutoimintaa ja tuotekehitystä vastaamaan valmistavan teollisuuden vaatimuksia. Valmistavan teollisuuden tämän hetkistä muutosta on kuvattu teollisuuden neljäntenä vallankumouksena, jossa nykyiset laitteistot ja koneet ovat entistä enemmän yhteydessä toistensa kanssa. Saksassa on julkaistu, Teollisuus 4.0:ksi nimetty visio, juuri tämän teollisen vallankumouksen haasteisiin tarttuva uusia teknologioita tuottava ajatusmalli. Teollisuus 4.0:n keskeisiä teknologioita ja toimintatapoja ovat virtuaalimaailman ja -mallien tehokkaampi hyödyntäminen, laitteiden ja järjestelmien välinen integraatio, jatkuvasti kasvavan datan määrän hyödyntäminen palveluissa ja toimintamalleissa sekä näissä kaikissa hyödynnettävät ohjelmistot. Tärkeänä osana teollisen vallankumouksen visiota on älykkäiden esineiden/laitteiden verkko, jossa koneet, prosessit ja laitokset keskustelevat keskenään.

Tässä työssä keskitytään käsittelemään näistä virtuaalisten mallien tehokkaampaa hyödyntämistä etenkin automaatio suunnittelussa sekä integroimalla mekaanista ja automaatio suunnittelua tällä tavoin paremmin toisiinsa. Tutkimus keskittyy pääasiassa mekatronisen laitteiston käyttöönottoon ja tätä edeltäviin suunnittelutoimenpiteisiin. Suunnittelu prosessia pyritään tehostamaan siten, että mahdolliset virheet havaittaisiin huomattavasti nykyistä aiemmin. Etenkin vasta käyttöönoton aikana havaittujen virheiden merkitykset ovat tuotteen kustannusten kannalta erittäin kriittisessä osassa.

## 1.1 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia millaisia hyötyjä simuloinnin ja virtuaalisen käyttöönoton avulla voidaan saavuttaa osana automaatiojärjestelmien suunnittelua. Työ toteutetaan osana Etteplan Oyj:n asiakasprojektia, johon toteutetaan Ideal Product Data

Oy:n tarjoamalla ohjelmistolla virtuaalinen käyttöönotto hyödyntäen mekaniikkasuunnittelun tuottamia 3D-malleja. Projektin tavoitteena on pystyä havaitsemaan automaatiojärjestelmän ohjauksessa olevat suunnitteluvirheet ja optimoimaan järjestelmän ohjauksen suunnittelua ennen laitteiston lopullista käyttöönottoa. Asiakasprojektin tarkempi sisältö ei kuulu tämän työn sisältöön, mutta työn tuloksissa esitellään tärkeimmät virtuaalisella käyttöönotolla havaitut hyödyt. Projektin toivottuna tuloksena on virtuaalinen kopio automatisoidusta lajittelulinjastosta, jota ohjataan todellisen laitteiston ohjaukseen käytettävällä laitteistolla.

## **1.2 Etteplan Oyj**

Etteplan tarjoaa sekä suunnittelu- että teknisen dokumentoinnin palveluja globaalisti toimiville kone- ja laitevalmistajille. Etteplan keskittyy korkean lisäarvon suunnitteluratkaisuihin, joissa asiakas ostaa palvelukokonaisuuden maksaen tuloksista. Suunnittelupalveluilla Etteplan pyrkii kattamaan tuotteen elinkaaren kaikki vaiheet. Vuonna 2015 suunnittelupalveluiden osuus Etteplanin liikevaihdosta oli 79,6 % ja teknisen dokumentoinnin puolestaan 20,4 %. Yritys keskittyy siis pääosin suunnittelupalveluihin, jotka tyypillisesti koostuvat uuden tuotteen tuotekehityksestä, ominaisuuksien innovoinnista tai toimitus-suunnittelusta. Vuonna 2015 teknisen dokumentoinnin osuus liikevaihdosta kasvoi kuitenkin huomattavasti enemmän verrattuna suunnittelupalveluihin. Kokonaisuudessaan yrityksen liikevaihto vuonna 2015 oli 141,1 miljoonaa euroa. Työntekijöitä yrityksessä oli vuoden 2015 lopussa 2074, joista 1368 Suomessa. [1]

## 2. TEOLLISUUS 4.0 JA DIGITALISAATIO

Virtuaalisen käyttöönoton kannalta on oleellista ymmärtää, mikä on johtanut käyttöönoton virtuaaliseen muotoon siirtymiseen. Osana virtuaalista käyttöönottoa on ympäristö, jossa virtuaalista mallia käsitellään. Tässä luvussa käsitellään teoriaa virtuaalisen käyttöönoton taustalla, keskittyen etenkin virtuaaliseen malliin ja sen taustoihin. Lisäksi käsitellään valmistavan teollisuuden syitä muuttaa toimintatapojaan. Saksan valtion tukema ja rahoittama Teollisuus 4.0 (*Industrie 4.0*) on tärkeä pohja ja suunnannäyttäjä sille, mihin valmistava teollisuus on menossa. Teollisuus 4.0:lla viitataan uuteen teolliseen vallankumoukseen, jossa siirrytään entistä enemmän digitaalisten tuotteiden suuntaan, hyödyntäen viimeisen vuosikymmenen nopeaa kehitystä, etenkin tiedonkäsittelyssä ja -hallinnassa.

### 2.1 Virtuaalinen todellisuus ja ympäristö

Virtuaalisella todellisuudella tarkoitetaan jonkin järjestelmän avulla tuotettua virtuaalista ympäristöä, jossa käsiteltävät objektit ovat. Virtuaalinen ympäristö määräytyy sen sisältämien objektien ja hahmojen avulla, joista voidaan välittää informaatiota visuaalisesti, haptisesti tai auditiivisesti. Useimmiten virtuaalinen ympäristö, etenkin teollisuuden käytössä, rajoittuu visuaaliseen tiedonvälitykseen. [2] Virtuaalisella todellisuudella pyritään joko mallintamaan todellisen maailman kappaleita tai luomaan täysin uusia. Molemmissa tapauksissa virtuaaliseen todellisuuteen luodut objektit ja hahmot sisältävät todellisesta maailmasta tuttua informaatiota (paino, väri, muoto...).

Virtuaalisen todellisuuden sisältö on jaettavissa eri ryhmiin: ympäristötopologia (*Environment topology*), käyttöliittymäelementit (*User Interface (UI) elements*) ja välittäjät (*Intermediaries*). Ympäristötopologia käsittää pinnanmuodot ja piirteet, käyttöliittymäelementit sisältää virtuaaliseen ohjaukseen käytettävät työkalut ja välittäjät sisältää käyttöliittymien avulla kontrolloidut muodot. Virtuaalinen todellisuus voidaan käsittää monella tapaa, jolloin myös nämä ryhmät sisältävät erityyppisiä komponentteja. Virtuaalinen läsnäolo (*Virtual presence*) jakaa virtuaalisen todellisuuden käsitteen ja samalla näiden ryhmien sisällön kahteen kategoriaan, fyysiseen ja psyykkiseen. Virtuaalisella läsnäololla tarkoitetaan tunnetta siitä, että käyttäjä on ”sisällä” tässä virtuaalisessa todellisuudessa. Usein virtuaalisen todellisuuden ja todellisen virtuaalisen läsnäolon määritelmään vaaditaan, että käyttäjä ei näe muuta kuin virtuaalisten mallien muodostaman todellisuuden. Lisäksi käyttäjä saa aistinvaraista palautetta ympäristöstään samaan tapaan kuin todellisessakin maailmassa. [2]

Tärkeä osa virtuaalista todellisuutta on käyttäjän mahdollisuus muuttaa tapahtumia interaktiivisesti. Tyypillisesti käyttäjä pystyy vähintäänkin muuttamaan näkymäänsä virtuaalitodellisuudessa, jolloin katselukulmaa ja -paikkaa pystyy muuttamaan. Mahdollisesti käyttäjä pystyy myös vaikuttamaan virtuaalisen ympäristön tilaan jollakin tavalla, esimerkiksi siirtämällä jotakin objektia tai muuttamaan sen liikkeen kulkua. Tästä syystä on oleellista virtuaalisen todellisuuden toiminnan kannalta, että ympäristöstä käyttäjä saa aistinvaraista palautetta toiminnastaan. Tämän palautteen on vastattava käyttäjän sijainnin ja katselukulman muutoksiin sekä muihin käyttäjän tekemiin muutoksiin.

3D-mallinnusohjelmilla tuotetut mallit ja simuloinnit voidaan ymmärtää kuuluvan virtuaalisen todellisuuden määritelmään monilta osin. Virtuaalisen todellisuuden neljä peruselementtiä ovat virtuaalinen ympäristö, aistinvarainen palaute, interaktiivisuus ja virtuaalinen läsnäolo. Mikäli nämä toteutuvat voidaan siis puhua virtuaalisesta todellisuudesta. Virtuaalinen läsnäolo voi kuitenkin olla vaikeata saavuttaa ilman käyttäjänäkymän tuottavia laseja ja todellisen virtuaalisessa todellisuudessa sisällä olemisen tunnetta.

### 2.1.1 Virtuaalinen tuote ja simulointi

Virtuaalisten mallien tuottama informaatio on lisääntynyt huomattavasti viime vuosina. Aiemmin tietokoneella tuotetuista piirustuksista on siirrytty 3D-pohjaisiin esityksiin, mallipohjaiseen suunnitteluun ja virtuaaliseen todellisuuteen sekä virtuaalisen tuotteen avulla toteutettuun elinkaarihallintaan. Mitä monimutkaisemmaksi tuotetut mallit menevät, sitä enemmän informaatiota niistä on myös saatavilla. Tuotetulla informaatiolla pyritään vähentämään ajallisia, energia- ja materiaalikustannuksia myöhemmissä vaiheissa kyseiseen malliin liittyvää projektia. Virtuaalinen tuote voidaan määritellä seuraavasti: *”Virtuaalinen tuote on käyttökohtainen tieto- tai bittipohjainen esitys kyseisestä tuotteesta ja siihen liittyvän fyysisen tai atomiperustaisen tuotteen sääntöpohjaisesta ympäristöstä sekä luonnollisesta käyttäytymisestä.”* [3] Virtuaalisella tuotteella on täten aina vastine reaali maailmassa, jonka käyttäytymistä tämän luonnollisessa ympäristössä tietokoneella mallinnettu virtuaalinen tuote pyrkii mukailemaan. Virtuaalisen tuotteen vastine voi olla jo joko olemassa tai vaihtoehtoisesti virtuaalisella tuotteella luodaan vastine tulevaisuudessa valmistettavasta tuotteesta. Tärkein kuitenkin on, että virtuaaliseen tuotteeseen kuuluu sen vastineen luonnollisen käyttäytymisen mallintaminen. Tämän mallintamiseen vaaditaan virtuaalinen ympäristö, jonka on vastattava todellisen maailman fyysisiä arvoja mahdollisimman tarkasti.

Virtuaalisen ympäristön vastatessa todellisuutta, voidaan tuotteen toimintaa simuloida ja verrata todellisen toimintaan tai varmistua virtuaalisen tuotteen avulla, että todellinen tuote on mahdollista toteuttaa. Simulaatiolla pyritään mahdollisimman tarkasti mallintamaan tuotteeseen kohdistuneet ulkoiset ärsykkeet ja niiden tuottamat vaikutukset. Täysin mallinnettavissa olevat simulaatiot voidaan jakaa kahteen kategoriaan:

- Virtuaalisen tuotteen simuloiminen suhteessa sen ympäristöön

- Virtuaalisen tuotteen simuloiminen ulkoisen kontrollerin tuottamaan ohjaukseen

Näistä ensimmäisessä virtuaalisen tuotteen käyttäytymiseen vaikuttaa ainoastaan fysikaaliset voimat, jotka virtuaalisen tuotteen ympäristöön on mallinnettu. Toisessa ulkoisesti tuotettu ohjaus määrittää virtuaaliseen tuotteeseen kohdistuvat tilamuutokset. Ulkoisen ohjauksen avulla voidaan toki luoda fysikaalisia voimia, jolloin kaksi edellä mainittua simulointitapausta voidaan käsittää kuuluvan yhteen.

## 2.2 Teollisuus 4.0 ja digitaalinen tehdas

Teollisuus 4.0-visio on lähtöisin Saksan hallitusstrategiasta, jonka tarkoituksena on ollut etenkin valmistavan teollisuuden kehittäminen ja tuotantoketjun optimointi sekä kilpailukyvyyn lisääminen. Samaan tulisi useiden mielipiteiden mukaan pyrkiä myös muualla Euroopassa, sillä on jo havaittu teollisuuden muuttavan ns. halvan työvoiman maista takaisin Eurooppaan. [4] Jotta uusia aluevaltauksia pystyttäisiin tekemään ja toimintaa kehittämään, on pystyttävä ottamaan uusia toimintatapoja ja teknologioita käyttöön. Keskeisiä teknologioita ja toimintatapoja ovat virtuaalimaailman ja -mallien tehokkaampi hyödyntäminen, laitteiden ja järjestelmien välinen integraatio, jatkuvasti kasvavan datan määrän hyödyntäminen palveluissa ja toimintamalleissa sekä näissä kaikissa hyödynnettävät ohjelmistot. Tärkeänä osana teollisen vallankumouksen visiota on älykkäiden esineiden/laitteiden verkko, jossa koneet, prosessit ja laitokset keskustelevat keskenään. Integroiduin työkaluin näitä voidaan ohjata sekä toisaalta älykkäät tehtaot kontrolloisivat ja optimoisivat tuotantoprosessiaan myös omatoimisesti. [5] Koko arvontuotantoketju pyritään suunnittelemaan ja optimoimaan siten, että oleellinen data on saatavilla oikeaan aikaan oikeassa paikassa. Teknologiateollisuuden silloinen johtaja Jukka Viitasaari korosti vuonna 2014 muutosta kohti palveluliiketoimintaa. Tähän teollisuus hyödyntää digitaalisia tekniikoita tuottamalla tuotteista kerätystä tiedosta asiakkailleen heille hyödyllistä informaatiota. Tällöin kyse ei enää ole hienosta teknisestä ratkaisusta vaan tämän päälle jalostetusta liiketoiminnasta. Hiljalleen voidaan siirtyä kohti pelkkien suoritteiden myymistä, jolloin ”kyse on hypystä arvoketjussa ylöspäin. Asiakas ei osta enää laitetta tai tuotetta, vaan hän ostaa suoritetta, ei metsäkonetta, vaan metsänkaatopalveluja eikä dieselmoottoria vaan kilowattitunteja.” [6]

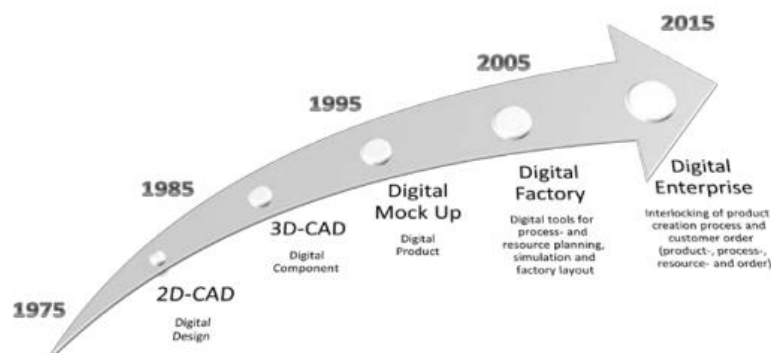
Datan kerääminen on tästä syystä olennaisessa osassa digitalisaatiota hyödynnettäessä. Älykkäiden laitteiden ei voida olettaa kommunikoivan keskenään tai antavan tietoa itseltään ilman jonkinlaista anturia, joka laitteen tilaa tarkkailee. Laitteiden monimutkaistuminen lisää antureiden määrää entisestään, jolloin myös mitatun datan määrä kasvaa. Haasteeksi muodostuukin datan analysointi ja parhaiden vaihtoehtojen tunnistaminen kässillä olevassa tilanteessa. Datasta muodostetun tiedon välittäminen tai siirtyminen tuotantoketjun ääripäihin saumattomasti on osa visiota automaattisesta tuotannon optimoinnista. Automatisoitujen laitteiden monimutkaisuus on haasteena jo tällä hetkellä ja lisäämällä toiminnallisuuksia nykyisten lisäksi luo vielä lisähaasteita koko järjestelmän toiminnalle. Yritysten on tuotettava hajautettuja, autonomisia laitteita, jotka kommunikoivat

toistensa kanssa, mahdollistaakseen tämän edellä mainitun vision optimoidusta tuotannosta. Tämä vaatii myös yksittäisiltä tuotantolaitteilta entistä enemmän ja niiden on oltava entistä innovatiivisempia sekä vähintäänkin yhtä varmatoimisia kuin aiemminkin. Onkin tärkeätä pystyä huomioimaan laitteiden todellinen toiminta jo mahdollisimman aikaisin sekä ottamaan huomioon laitteilta vaadittu kommunikointi järjestelmän muille tasoille sekä toisille laitteille. [5, 6, 4] Tässä työssä keskitytäänkin etenkin tuotteen elinkaaren alkuvaiheeseen ja tarkemmin suunnitteluvaiheeseen sekä käyttöönottoon. Tässä vaiheessa oleellinen termi on markkinoille tuloaika, jota pyritään lyhentämään joustavilla ja optimoiduilla suunnitteluprosesseilla. Tuotteen suunnittelu ja käyttöönotto yhdistetään virtuaalimaailmaan ohjaamalla todellisella automaatiojärjestelmällä virtuaalista kopiota oikeasta tuotantoyksiköstä.

Digitaalinen tehdas on termi mallille, joka käsittää yleensä valmistavan teollisuuden tehtaan digitaalisen kopion. Mallissa on toteutettu valmistusprosessi, tuotannon kokoonpano, laadun valvonta ja muita tuotekohtaisia tuotteen elinkaaren vaiheita. Digitaalisen tehtaan malli ei ole vain kokoelma 3D-malleja, digitaaliseen tehtaaseen kuuluu integroitu digitaalinen tuotannonsuunnittelun sekä valmistusprosessin ohjaus. Digitaalisen tehtaan -konsepti voidaan täten suurimmalta osin käsittää eri elinkaarivaiheiden simulaatioksi. Tällä pyritään vaikuttamaan ja aikaistamaan päätöksentekoa sekä parantamaan valmistusympäristöä. [7] Nimensä mukaisesti digitaalinen tehdas on tarkoitus pitää täysin digitaalisena mallina tulevasta tehtaasta, jolloin kaikkien haluttujen toimintojen toimivuus voidaan varmistaa simuloimalla, ennen varsinaisen fyysisen tuotteen valmistusta. Verrattaessa perinteisen fyysisen ja digitaalisen tehtaan datan määrää ja tarvetta, digitaalinen tehdas tarvitsee myös 3D-suunnitteluohjelmistoilla tuotettua dataa. Muu digitaalisen tehtaan tarvitsema data pyritään tuottamaan vastaavalla tavalla kuin todellisenkin tehtaan tapauksessa. [8] Kuvassa 1 on esitetty eri vuosikymmeninä esiteltyjä teknologioita, joilla on pyritty kontrolloimaan kasvavaa datan määrää ja tuotteiden kompleksisuutta.

## From 2D-CAD to the Digital Enterprise

Managing the complexity of product, process and resource through continuously digital processes integration

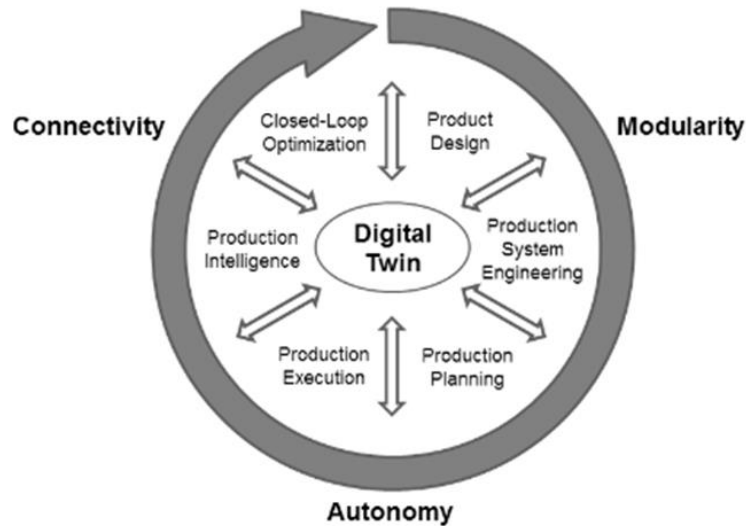


**Kuva 1.** Eri teknologioita kasvavan informaatiomäärän käsittelyyn [9]

Kuvassa 1 on määritelty digitaalisen tehtaan käsittävän työkalut prosessi- ja resurssisuunnitteluun, simulaatioon ja tehtaan layout suunnitteluun. Digitaalinen tehdas voidaan jakaa osioihin, jolloin kaikki data ei ole kaikkien saatavilla. Tässä työssä pääpaino on mekaanisen ja automaatio-osion toteutuksissa hyvissä ajoin ennen lopullisen tehtaan tai tuotantolinjan rakentamista. Kun todellista tuotantoyksikköä (tehdas, linja, solu...) vastaavaa virtuaalista mallia ohjataan ja varmennetaan ennen lopullisen rakentamista, käytetään tästä usein termiä virtuaalinen käyttöönotto. Virtuaalinen käyttöönotto on siis vain osa digitaalisen tehtaan konseptia. Tyypillisesti digitaalisen tehtaan konsepti otetaan mukaan kun on saatu varmuus siitä, millainen lopullinen tuotantoyksikkö tulee olemaan. [9] Liitettessä virtuaalinen käyttöönotto mukaan konseptiin voidaan aloittaa virtuaalisen mallin integrointi aiemmin. Otettaessa virtuaalinen malli mukaan jo hyvissä ajoin ennen todellisen tuotantoyksikön olemassaoloa, pystytään vähentämään työkuormaa siinä vaiheessa kun sekä digitaalinen että fyysinen tehdas ovat toiminnassa.

### 2.3 Virtuaalinen kaksosen

Virtuaalisen kaksosen (*Digital Twin*), eli fyysisen tuotteen digitaalisen vastineen, käsite itsessään on jo jokseenkin vanha ja esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 2003 Michigalin yliopistossa Michael Grievesin toimesta [10]. Konseptia esiteltäessä 3D-mallinnus ja tuotteiden esittäminen digitaalisessa muodossa ei ollut vastaavalla tasolla, jolla se nyt on. Grievesin esittämä konsepti käsittelee lähinnä valmistettavien tuotteiden digitaalisia vastineita, jolloin digitaaliset mallit rajoittuvat kooltaan pieniksi yksittäisiksi kokonaisuuksiksi. Tästä huolimatta virtuaalisella kaksosella tarkoitetaan mitä tahansa tuotetta, jolla on fyysinen vastine reaali maailmassa, virtuaalinen malli virtuaalitodellisuudessa sekä yhteys näiden kahden välillä. Tällä yhteydellä on tarkoitus siirtää informaatiota molempiin suuntiin ja virtuaalisen kaksosen konseptin suurimpana hyötynä voidaan pitää työskentelyä sekä virtuaalisen että fyysisen tuotteen kanssa samanaikaisesti. Hyvä esimerkki tästä on esimerkiksi tuotteen kokoonpanovaiheen testaus, jossa fyysistä tuotetta kasataan ja samalla virtuaalisella mallilla simuloidaan valmistus/kokoonpanoympäristöä parantaen valmistuksen sujuvuutta. Mikäli jokin toiminto ei onnistu fyysisen tuotteen kanssa voidaan samalla simuloida jo uusia vaihtoehtoja virtuaalista kaksosta hyödyntäen.



**Kuva 2.** Virtuaalisen kaksosen tuottama informaatio tuotannon eri vaiheissa [11]

Suurin ongelma virtuaalisen kaksosen hyödyntämisessä tällä hetkellä on se, että 3D-malleja käytetään lähinnä vain suunnitteluvaiheessa, jonka jälkeen ne hylätään. Kuvassa 2 on havainnollistettu virtuaalisen kaksosen käytettävyyttä eri tuotantovaiheissa tuotteen elinkaarta. Jotta digitaalisen kaksosen konseptia pystyttäisiin hyödyntämään täysipainoisesti, vaaditaan fyysiseltä tuotteelta vastaavuutta virtuaalisen kanssa. Yksi vaihtoehto on toisaalta luoda kevyempiä versioita fyysisestä tuotteesta, jotka eivät sisällä aivan kaikkia komponentteja, mutta vastaavat toiminnaltaan kuitenkin oikeaa tuotetta. Tämä osaltaan keventää malleja sekä vähentää mallin päivitystyötä fyysisen tuotteen muuttuessa. Kevyemmällä malleilla reaaliaikainen simulointi ei vaadi niin paljon laskentatehoa ja virtuaalimalliin pystytään sisällyttämään enemmän fyysisestä tuotteesta kerättyä dataa näiden toimiessa samanaikaisesti. Virtuaalimallin puolella olisi mahdollista tarkastella reaaliaikaisesti tuotteen valmistuksen kannalta kriittisiä tietoja ja huomauttaa poikkeamista. Esimerkiksi muutokset valmistuslaitteiston liikenopeuksissa tai tuotteeseen kohdistetuissa voimissa tai momenteissa pystyttäisiin havaitsemaan virtuaalisen mallin puolella osakohdaisesti. Luomalla fyysisen ja virtuaalisen tuotteen välille tallennuspaikka kaikelle näiden väliselle informaatiolle, mahdollistetaan toimintojen toistaminen uudelleen. Etenkin fyysisen tuotteen vikaantuessa toistamalla tarkat tapahtumat uudestaan virtuaalisella mallilla voitaisiin havaita mahdollisia poikkeamia normaaliin toimintaan verrattaessa. [11, 10]

Digitaalinen kaksonen helpottaa perinteistä ongelmanratkaisua ja innovointia hyödyntäen kolmea työkalua, käsitteellistämistä, vertailua ja yhteistyötä. Tuotteen tuotannon suorituskykyä voidaan virtuaalisen kaksosen avulla seurata simuloidun/toistetun toiminnan kautta, eikä ainoastaan numeeristen suorituskykyarvojen avulla. Vertailtaessa haluttuja suoritusarvoja fyysisen tuotteen todellisiin suoritusarvoihin voidaan, toistamalla toimin-



not virtuaalisella mallilla, nähdä poikkeamat niiden tapahtuessa ja analysoida niihin joh-  
taneet tapahtumat nopeammin. Toivotuille suoritusarvoille voidaan antaa raja-arvot, joi-  
den sisällä on pysyttävä ja arvojen muutoksia voidaan seurata esimerkiksi värikoodauk-  
sella. Tällöin ylitettäessä raja-arvo voidaan tästä ilmoittaa punaisella värillä kyseisen osan  
ja arvon kohdalla. Tähän arvoon vaikuttavia toimintoja päästään täten säätämään ja muu-  
tosta testaamaan virtuaalisen mallin puolella heti. Virtuaalinen kaksonen antaa mahdolli-  
suuden jakaa tietoa entistä helpommin. Kaikki kyseisen tuotteen kanssa tekemisissä ole-  
vat voivat nähdä malliin tehdyt muutokset olivat he missä tahansa. Täten myös toisella  
puolen maailmaa oleva tuotanto voi tehdä muutokset omaan tuotantolinjaansa virtuaali-  
sen mallin pohjalta ja suoritusarvojen sekä tuotteen vastaavuus haluttuun voidaan tarkas-  
taa uudelleen. [10, 3]

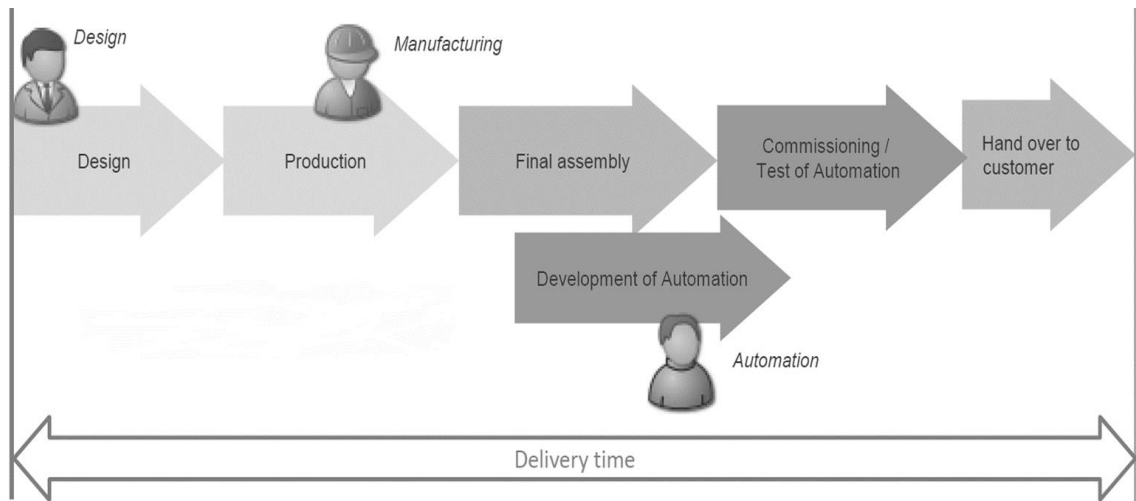
### 3. SUUNNITTELUPROSESSI

Oli kyseessä tuotekehitysprojekti tai suunnitteluorganisaation toteuttama yksittäinen laitteistototeutusprojekti, noudattaa se tällaiselle projektille tyypillistä kaavaa. Tässä luvussa käydään läpi tyypillisen suunnitteluprosessin kulku ja siihen liittyvät automaatio suunnittelun osuudet. Pääpaino on etenkin käyttöönotossa ja sen laajuuden määrittämisessä suunnitteluprosessin osana. Lisäksi käsitellään simulointia osana automaatio suunnittelua sekä virtuaalisen käyttöönoton erityispiirteitä verrattaessa tyypilliseen simuloinnin hyödyntämiseen sekä perinteiseen käyttöönottoon.

#### 3.1 Suunnitteluprosessi ja käyttöönotto

Käyttöönotolla tarkoitetaan laitteen tai koneen ensimmäistä käynnistystä, sitä juuri edeltäviä ja edesauttavia toimenpiteitä ja toimenpiteiden sekä toimintojen tarkastamista. Käyttöönotto on viimeinen osa suunnitteluprosessia ennen lopullisen tuotteen luovuttamista käyttäjälle, vaikka sopimuksesta ja tapauksesta riippuen suunnitellut taho voikin jatkaa toimintaa tuotteen yhteydessä myös luovutuksen jälkeen. Tyypillinen tapa suorittaa käyttöönottoa on lähteä liikkeelle yksittäisistä pienistä komponenteista ja edetä ylemmäs laitekokonaisuuksien ja osajärjestelmien väliseen kommunikointiin. Käyttöönotto kuuluu useimmiten suunnitellelle taholle osana järjestelmän toimitusta asiakkaalle ja täten on tärkeätä saada asiakas ymmärtämään miten uuden tai uudistetun järjestelmän on tarkoitus toimia saavuttaakseen asiakkaan vaatiman suorituskyvyn. [9] Tästä syystä yksi käyttöönoton kriittisimmistä asioista (järjestelmän monimutkaisuudesta riippuen) on käyttöhenkilökunnan koulutus. Mikäli käyttöhenkilökunta ei osaa käyttää uutta järjestelmää kuten sitä on tarkoitettu käytettävän, voi usein järjestelmä jäädä tavoitellusta suorituskyvystä. [12]

Perinteinen käyttöönotto vaatii järjestelmän olemassaolon, tarkoittaen sitä, että ennen lopullista koneen tai järjestelmän toiminnan varmistamista on kyseinen fyysinen kokonaisuus oltava kasattuna. Kuvassa 3 on esitetty yksi näkemys suunnitteluprojektin eri vaiheiden aikataulutuksesta, jossa automaation kehitys ja testaus aloitetaan varsin myöhäisessä vaiheessa. Automaatio suunnittelu vaatii usein sen, että mekaaninen konsepti on selvillä ja laitteiden toimintatavoista on varmuus, jotta niiden ohjausta voidaan suunnitella. Tämä on suuri syy siihen, ettei automaatiojärjestelmän ohjauksen suunnittelua toisaalta edes kannata aloittaa liian aikaisin ilman varmuutta valitusta laitteistosta.



**Kuva 3.** Eräs malli perinteisen suunnitteluprosessin ja käyttöönoton kulusta [13]

Kuvassa 3 esitetyn perinteisen suunnitteluprosessin ongelma on, että jokainen vaihe voidaan suorittaa vasta edellisen jälkeen. Vaikka kuvassa 3 automaatiojärjestelmän kehitys suoritetaan osittain limittäin loppukokoonpanon ja käyttöönoton kanssa, puuttuu mallista kuitenkin iterointi ja palaaminen edelliseen vaiheeseen. Suunnittelutyö, jossa eri osakokonaisuuksien suunnittelu on jaettu eri osiin yritystä, ajautuu helposti vastaavaan tilanteeseen. Monta projektia käynnissä samaan aikaan ja päivittäisen kanssakäymisen puute osastojen välillä ajavat suunnitteluprosessin helposti siihen, että projekti ikään kuin siirretään seuraavan osaston jatkettavaksi. Suunnitteluprosessin tämän tyyppinen jakaminen voi johtaa usein siihen, että virheitä havaitaan, ja päästään korjaamaan, vasta käyttöönottovaiheessa. [9]



**Kuva 4.** Havaitun virheen korjauksesta aiheutuvat kustannukset projektivaiheittain [9]

Kuvassa 4 on havainnollistettu virheen havaitsemisen ajankohdan vaikutusta sen aiheuttamiin kustannuksiin. Mitä aiemmin virhe havaitaan, sitä halvempi se on korjata. Periaatteessa kustannukset nousisivat kuvan 4 esittämää vieläkin korkeammaksi virheen havaitsemisen tapahtuessa vasta tuotantovaiheessa. Virheen aiheuttamat kustannukset voivat olla jo tällöin liian suuria ja on järkevämpää hyväksyä toiminta sellaisena kuin se nyt on ja pyrkiä korjaamaan ongelma myöhemmin. Mikäli virhe pääsee näin pitkälle suunnitteluprosessissa, nousee esiin kysymys korjausvastuusta asiakkaan ja suunnittelevan tahon välillä, kumpi on vastuussa virheen syntymisestä ja kumpi on tällöin velvollinen sen korjaamaan. Olennaiseksi muodostuvat projektin alkuvaiheen toimintamäärittelyt. Jos virhe on tapahtunut suunnittelevan tahon puolella ja toiminta on toteutettu väärin, voivat kustannukset nousta todella korkeiksi. Harvemmin näin kuitenkaan pääsee käymään ja vika havaitaan jossakin vaiheessa ennen tuotannon aloittamista. Usein detaljisuunnittelun ja käyttöönoton välissä toteutetaan jonkinlainen hyväksyntätesti asiakkaan kanssa. Näitä on muutamia erityyppisiä, joissa eroavana tekijänä on lähinnä toteutuspaikka [12]:

- *Factory Acceptance Test (FAT)*; Testi, jossa ohjausjärjestelmän ja ohjelmiston toiminta testataan toimintamäärittelyjä vastaavaksi. Voidaan toteuttaa suunnittelevan tahon tiloissa tai asiakkaan tiloissa. Ajoittuu yleensä detaljisuunnittelun loppupuolelle.
- *Site Acceptance Test (SAT)*; Lopullisella tuotantolaitoksella toteutettava FAT:a vastaava testi.
- *Site Integration Test (SIT)*; Juuri ennen käyttöönottoa tai osana käyttöönottoa toteutettava testi, jolla varmistetaan osajärjestelmien toiminta toistensa kanssa.

Mitä näistä kolmesta testistä toteutetaan, on projektikohtaista ja osittain ne voivat kuulua perinteisen käyttöönoton piiriin. Olennaista ei ole millä nimellä testit ja järjestelmän halutun toimivuuden varmistukset tunnetaan, tärkeätä on pyrkiä suorittamaan FAT:n tyyppinen varmistus asiakkaan kanssa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Useimmiten juuri FAT:ssa tulee esiin, mikäli asiakkaan ja suunnittelevan tahon käsityksissä laitteiston toiminnasta on eroja ja korjattavaa löytyy. Tästä syystä kuvan 4 käyrä on jyrkimmillään juuri detaljisuunnittelun ja käyttöönottovaiheen kohdalla.

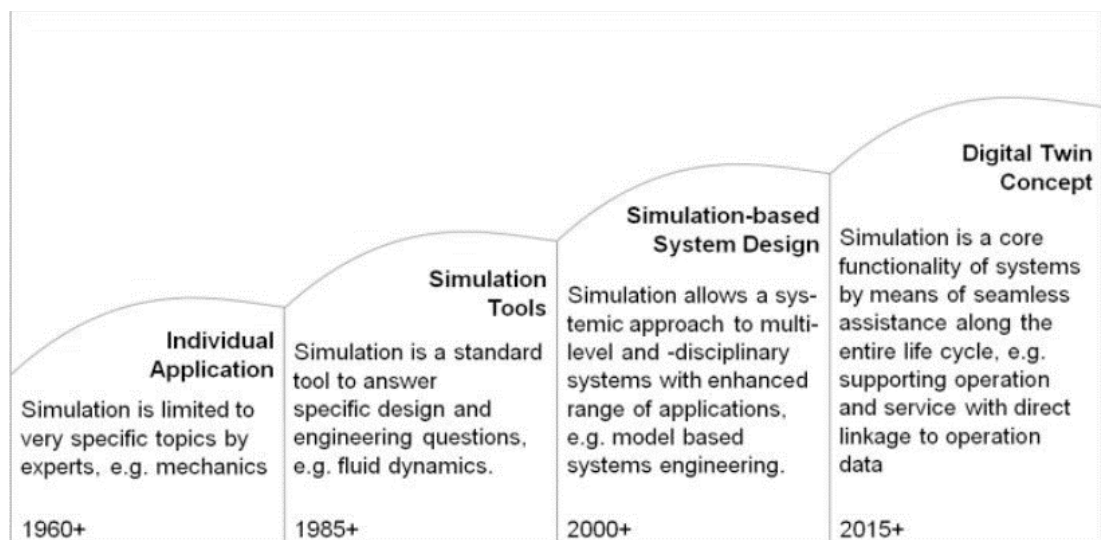
Phase	Activity	Possibility of error	Effects of errors	Perceptibility of errors	Error probability	In scope of integrated virtual commissioning
1 Basic Determination	1.1 Set project goals	0,6	1,0	0,6	0,36	
	1.2 Make a rough cost estimate	0,4	0,6	0,2	0,05	
2 Preliminary Engineering	2.1 Create a concept for the plant	1,0	1,0	0,8	0,8	
	2.2 Make a cost estimate	0,6	0,6	0,2	0,07	
3 Basic Engineering 19%	3.1 Determine PCT functions	0,8	0,8	0,6	0,38	
	3.2 Collect process engineering data	0,8	0,6	0,4	0,19	
	3.3 Determine technical implementation	0,8	1,0	0,4	0,32	
	3.4 Calculate costs	0,6	0,8	0,4	0,19	
4 Detail Engineering 45%	4.1 Select equipment	0,6	0,8	0,6	0,29	
	4.2 Determine central facilities	0,4	0,8	0,6	0,19	
	4.3 Specify a control system	0,6	0,6	0,8	0,29	x
	4.4 Create loop diagrams	0,4	0,2	0,4	0,03	x
	4.5 Create loop function sheets	0,6	0,4	0,6	0,14	x
	4.6 Prepare installation documents	0,6	0,6	0,4	0,14	
5 Construction 24%	5.1 Make arrangements for order placing	0,6	0,8	0,4	0,19	
	5.2 Confirm delivery	0,4	0,2	0,2	0,02	
	5.3 Configure software	1,0	0,6	0,6	0,36	x
	5.4 Prepare for installation	0,4	0,8	0,4	0,13	x
	5.5 Monitor installation	0,4	0,6	0,4	0,1	
	5.6 Performance check	0,4	0,6	0,6	0,14	x
6 Commissioning 4%	6.1 Train personnel	0,2	0,8	0,8	0,13	x
	6.2 Provide assistance during commissioning	0,4	0,6	0,8	0,19	x
	6.3 Revise documentation	0,2	0,2	1,0	0,04	
	6.4 Hand over documentation	0,2	0,2	1,0	0,04	
7 Project completion	7.1 Prepare final report	0,2	0,2	1,0	0,04	
	7.2 Prepare cost balance	0,2	0,2	0,2	0,01	
		13,40	15,60	14,40	4,83	1,41

**Kuva 5. Projektin eri suunnitteluvaiheissa havaittuja virhelähteitä [12]**

Kuvassa 5 on esitetty tarkemmin eri vaiheissa suunnittelua syntyvien virheiden mahdollisia lähteitä ja todennäköisyyksiä. Kuvassa on esitetty lisäksi virheiden merkittävyys projektin jatkoa ajatellen. Kuvan 5 vaiheissa 1, 2 ja 3 etenkin projektin tavoitteiden määrittäminen (1.1), ensimmäisen konseptin luonti (2.1) sekä teknisen toteutuksen päättäminen (3.3) ovat kriittisiä virheen vaikutusten kannalta. Näistä konseptin luonti on (automaatio)järjestelmän konfiguroinnin (5.3) kanssa myös mahdollisena virhelähteenä suurin. Mentalessa projektin loppua kohden havaitaan, että virheiden merkitys pienenee. Johtuen siitä, että niiden korjaukseen ei vaadita yhtä suuria muutoksia verrattaessa projektin alkuvaiheissa tapahtuneisiin virheisiin. Kaiken kaikkiaan kuvasta 5 on pääteltävissä tavoitteiden määrittäksen, projektin konseptoinnin, teknisen toteutuksen, ohjausjärjestelmän sekä ohjelmoinnin tärkeys. Nämä kaikki ovat merkittäviä virhelähteitä sekä vaikuttavat lopulliseen toimintaan suurissa määrin. Ohjausjärjestelmän toiminnan tarkistus ja ohjelmointi ovat tärkeä osa myös käyttöönottoa, vaikka kuvassa 5 nämä ovatkin sijoitettuna edeltäviin vaiheisiin. Liu et. al. [9] esittävät käyttöönoton vievän ajallisesti noin 15–20 % koko projektin kestosta. Tästä ohjausjärjestelmän ja automaatiolaitteiston osuus on 90 %, josta puolestaan noin 70 % kuluu ohjelmointi- tai ohjelmistovirheisiin. [9] Vaikka virheiden merkitys ohjausjärjestelmän ohjelmointivaiheessa ei ole niin suuri kuin aivan projektin alkuvaiheessa, tuottaa siinä aiheutuvat virheet ajallisesti tappioita täten keskimäärin 9,5 – 13 % koko projektiin käytetystä ajasta.

### 3.2 Simulointi osana suunnittelua

Simuloinnilla saavutetaan aikaisessa vaiheissa vähintäänkin suuntaa antavia tutkimustuloksia ja simulointia hyödynnetään etenkin monimutkaisissa kokonaisuuksissa. Simuloinnilla saadaan käsitys tuotteen tai laitteiston toiminnasta normaalia kehitysprojektin vaihetta aiemmin, silloin kun ajalliset paineet muutoksien toteuttamiseen ovat pienemmät. Samalla voidaan toteuttaa eri vaihtoehtojen vertailua ja testausta. [14] Vaikkakin monimutkaiset kokonaisuudet tekevät myös simuloinnista monimutkaista ja simuloitavien parametrien määrä kasvaa, on simuloinnista selkeitä hyötyjä suunnittelun alkuvaiheessa. Tyypillisimpiä simulointitapauksia on rakenteen lujuustarkastelu 3D-mallinnusohjelmiston FEM(*Finite Element Method*)-analyysiohjelmilla. [11] Kuvassa 6 on esitetty simuloinnin kehittymistä osana suunnitteluprosessia. Simuloinnilla on pyritty aina kehittämään suunnittelutoimintaa ja ratkaisemaan ongelmia ennen niiden havaitsemista lopullisessa tuotteessa. Tästä syystä simulaation tuottamia hyötyjä on usein vaikea mitata konkreettisesti. [15]



Kuva 6. Simulaation hyödyntäminen suunnittelussa [11]

Aiemmin simulointi rajoittui kuvan 6 mukaisesti yksittäisiin pieniin kokonaisuuksiin ja vain kaikista monimutkaisimmat yksityiskohdat simuloitiin. Laskentatehon kasvaessa pystyttiin simuloimaan jo laajempi kokonaisuuksia, kuten kokonaisia ohjausjärjestelmiä ja niihin liittyviä toimilaitteita sekä näiden komponentteja. Nykyisin simulointi on entistä monipuolisempaa ja simulointimallit kattavat huomattavasti laajempia kokonaisuuksia. Virtuaalisen kaksosen konseptin mukaista simulointia pyritään hyödyntämään koko tuotteen elinkaaren ajan. Yhtä ja samaa simulointimallia pyritään hyödyntämään mahdollisimman monessa paikassa, kuten toimilaitteiden ja laitteiston mitoituksessa, automaatiojärjestelmän testauksessa ja käyttöhenkilökunnan koulutuksessa.

Laskentatehon kasvu on mahdollistanut myös reaaliaikaisimuloinnin, joka on kuvassa 6 esitetyn 2000-luvun alun mallipohjaisen järjestelmäsimuloinnin osalta tärkeä ominaisuus. Reaaliaikaisimulointi mahdollistaa suurempien toimilaittekokonaisuuksien ja järjestelmien simuloinnin samanaikaisesti. Reaaliaikaisimuloinniksi määritellään se, että simulointimalli vastaa ärsykyksiin määritellyn vasteajan sisällä. Vasteajan pituudella määritellään eri tasoja reaaliaikaisuudelle, *hard*, *firm* ja *soft*, joista ensimmäinen on vaatimuksiltaan tiukin ja viimeiseen kuuluvat kaikki kahteen muuhun kuulumattomat. Hard-luokan vaatimustasossa vasteajan ylityksen jälkeiset seuraukset voivat olla katastrofaaliset. Keskimäisessä luokassa vasteajan ylitys mitätöi tulokset, mutta seuraukset eivät ole vakavia. Soft-luokan reaaliaikaisimuloinniksi voidaan luokitella periaatteessa minkä tahansa simulointi sillä vasteajalle ei ole olemassa maksimiarvoa. Yleisesti kuitenkin reaaliaikaisimuloinnista puhutaan, mikäli simulointi tapahtuu todellisuutta vastaavalla nopeudella. [16]

### 3.2.1 Hardware- ja Software-in-the-loop simulointi

*HIL*-simulointi eli *Hardware-in-the-loop*-simulointi hyödyntää todellisia komponentteja, jotka on yhdistetty reaali-aikaisimuloiuihin komponentteihin. *HIL*-simuloinnissa ohjaava automaatiojärjestelmä on todellinen, jolloin simuloinnin avulla pystytään todentamaan automaatiojärjestelmän oikeanlainen toiminta. Etenkin tuotekehitysprojekteissa on todettu hyödylliseksi päästä testaamaan ohjaavaa järjestelmää jo etukäteen ja simuloimaan kriittisimpiä toimintoja jo hyvissä ajoin ennen perinteisen prototyypin valmistamista. Usein voidaan myös tehdä niin, että vaikeasti mallinnettavat toimilaitteet ovat todellisia ja kaikki muu tähän ympärille (ohjausjärjestelmää lukuun ottamatta) ovat simuloituja. [14]

*Software-in-the-loop*-simulointi (*SIL*) on puolestaan toteutettu täysin virtuaalisesti ilman mitään fyysistä laitteistoa. *SIL*-simuloinnissa automaatiojärjestelmän kontrolloiva laitteisto, tyypillisemmin PLC, on toteutettu virtuaalisella ohjaimella eli emulaattorilla. Tällöin toiselle käyttöjärjestelmälle tarkoitettua ohjelmaa voidaan käyttää uudella alustalla. Automaatiojärjestelmien tapauksessa toimisto PC:llä käytetään simuloitua ohjelmoitavaa logiikkaa. Hyvänä puolena *SIL*-simuloinnissa on fyysisen laitteiston tarpeettomuus, mutta ongelmaksi muodostuu ohjelmoitavien logiikoiden luotettava toiminta PC:llä käytettäessä. Jotta simuloidun PLC:n toiminta vastaisi täydellisesti oikeata PLC:tä, on käytössä oltava PLC:n päivityksiä vastaava versio. Toisaalta myös PLC:n syklinen suoritustapa voi olla epäluotettava PC:llä käytettäessä, eikä todellisen PLC:n suoritussopeuksiin välttämättä päästä. Toisaalta hyvänä puolena on, että mitään investointia ohjaavaan laitteistoon ei tarvitse tehdä liian aikaisin. Mikäli ei olla aivan varmoja millaisella laitteistolla ohjaus toteutetaan, voidaan *SIL*-simuloinnilla testata useita ratkaisuja pienillä investoinneilla. [17]

Molempien edellä mainittujen simulointitapojen hyödyiksi voidaan lukea seuraavat (osa kuitenkin vaatii todellisen ohjaavan laitteiston olemassaolon, eivätkä täten päde kuin *HIL*-simulointiin) [14]:

- Simuloitujen tilanteiden toistettavuus ja uudelleentarkastelu
- Säästöt suunnittelussa aiheutuneissa kuluissa ja kehitykseen käytetyssä ajassa
- Äärimmäisten ja turvakriittisten tilanteiden sekä erilaisten vikatilanteiden testaus ja operointi aiheuttamatta vahinkoa laitteistolle tai ihmisille
- Aikaisempi HMI (*Human-Machine Interface*) vaihtoehtojen testaus ja käyttäjien koulutus
- Ohjauslaitteiston ja -ohjelmiston suunnittelu ja testaus ilman liityntää todelliseen prosessiin
- Todellisen signaaliliittymän testaus prosessin ja ohjaavan laitteiston välillä
- Eri ohjauslaitteisto vaihtoehtojen testaus laboratoriossa simuloiden todellisia olosuhteita loppukohteessa (lämpötilavaihtelut, pöly, värinä, sähkönsyötön häiriöt jne.)

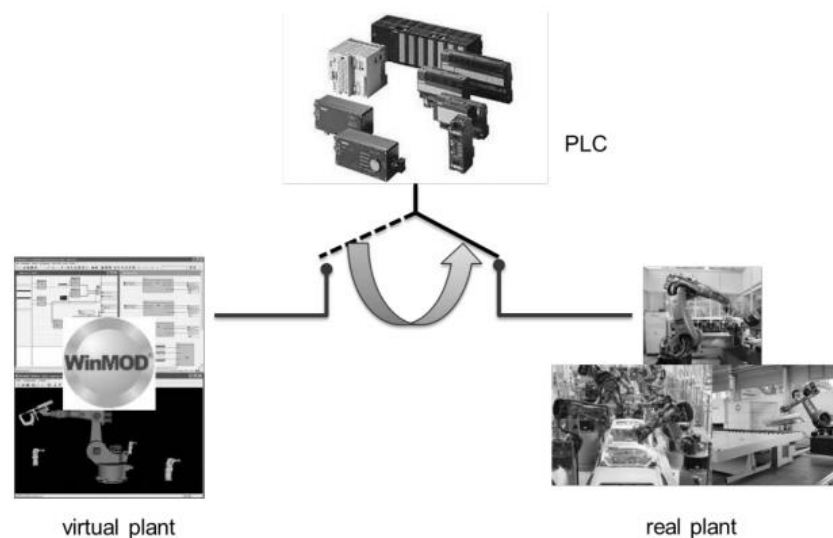
Oli kyseessä SIL- tai HIL-simulointi, oleellinen määritelmä molempien kategorioiden simulointeihin on, että ”*simuloidun prosessin sisäänmeno- ja ulostulosignaalit vastaavat samoja aikariippuvaisia arvoja kuin todellisilla dynaamisesti operoitavilla komponenteilla.*” [18] Tärkeä termi edellä olevassa lauseessa on aikariippuvaisuus. HIL- ja SIL-simuloinnit määritetään siis reaaliaikasilmoinniksi, jolloin tapahtumat tapahtuvat sekä ohjausjärjestelmän, että laitteiston puolella lyhyen vasteajan sisällä. Myös reaaliaikasilmoinnin määritelmään kuuluva simulointitapa *Control prototyping* poikkeaa HIL- ja SIL-simuloinnista vaatien todellisen prosessin. Tässä simulointitavassa pyritään kehittämään ohjausjärjestelmää prototyypin avulla kohti lopullista toteutusta. Näistä kolmesta parhaiten virtuaalisen käyttöönoton konseptiin soveltuu HIL-simulointi, jossa todellisen ohjausjärjestelmän avulla ohjataan konseptoitua tuotantolaitteistoa. Sillä suunniteltaessa ja käyttöönotettaessa uutta laitteistoa on yleensä määritettävä käytettävä ohjauslaitteisto hyvissä ajoin ja suunnitellun laitteiston tarkka toiminta on vielä epävarmaa. Toki poikkeuksiakin on, joissa perinteiset ohjausjärjestelmät eivät pysty tuottamaan haluttuja toimintoja, jolloin *Control prototyping* on vartenotettava vaihtoehto. [19]

### 3.2.2 Virtuaalisen käyttöönoton erityispiirteet

Virtuaalisessa käyttöönotossa automaatiojärjestelmän ja suunnittelun mekaanisen konseptin toiminta testataan virtuaalisella mallilla. Hieman eri lailla kuin virtuaalisen kaksosen konseptissa, virtuaalisen käyttöönoton konseptissa pyritään minimoimaan tarve fyysiselle tuotteelle. Luvussa 2.3 virtuaalisen kaksosen konseptiin sisällytettiin aina fyysinen tuote tai tuotantoyksikkö, tämän digitaalinen vastine sekä informaatioyhteys näiden kahden välillä. Virtuaalinen käyttöönotto lähtee puolestaan liikkeelle siitä, että fyysisiä materiaaleja pyritään käyttämään vasta kun suunnitelma on valmiina ja tuote tai tuotantoyksikkö on valmiina kasattavaksi. Verrattaessa perinteiseen suunnitteluprosessiin virtuaalisessa käyttöönotossa pyritään vähentämään prototyyppien määrä minimiin ja todentamaan kaikki mahdolliset toiminnot virtuaalisella mallilla. Tällöin tuote tai tuotantoyksikkö on ohjattavissa ja sen suoritusarvoja voidaan tarkastella jo hyvissä ajoin ennen kuin valmistusmateriaaleihin on sijoitettu yhtään rahaa. [12] Tästä huolimatta virtuaalinen



käyttöönotto ei ole kilpaileva idea virtuaaliselle kaksoselle, vaan lähinnä osa sitä. Hyödyntämällä virtuaalista käyttöönoton ideaa toimiva virtuaalinen malli luodaan ensin ja tämän pohjalta sitten todellinen tuote tai tuotantoyksikkö. Tällöin virtuaalinen kopio on luotu osana tuotteen suunnittelua ja on olemassa samaan aikaan kun todellinenkin tuote. Toiminnaltaan ja ajatukseltaan virtuaalinen käyttöönotto on hyvin lähellä HIL-simulointin periaatetta. Mitä lähemmäs todellista käyttöönottoa mennään, sitä enemmän virtuaalinen käyttöönotto tuo suunnitteluprojektiin lisäarvoa verrattaessa HIL-simulointiin. Se, että käytetäänkö suunnitteluprojektin alkuvaiheessa terminä HIL-simulointia vai virtuaalista käyttöönottoa, ei ole merkityksellistä. Virtuaalisen käyttöönoton toiminnallisuutta on havainnollistettu kuvassa 7, jossa ohjaavan automaatiojärjestelmän PLC:n signaalit ovat kytkettävissä ohjamaan joko virtuaalista tehdasta tai todellista tehdasta. Virtuaalisen käyttöönoton voidaan ajatella onnistuneen täydellisesti, jos PLC:n signaalit kytketään kuvan 7 tapaan todelliseen tehtaaseen ja järjestelmä toimii suunnitellusti.



**Kuva 7.** *Vaihdos todellisen ja virtuaalisen käyttöönottokohteen välillä [9]*

Virtuaalista käyttöönottoa on hyödynnetty lähinnä kuvassa 3 esitetyn automaation kehitysvaiheen paikalla. Tällöin virtuaalisesti testataan osa-alueet, joita ei vielä päästä todellisuudessa testaamaan, minimoiden samalla laitteisto- sekä henkilövahinkoja tuottavat riskit. Alkuun virtuaaliseen käyttöönottoon viitattiin termillä *soft commissioning*, joka voidaan käsittää ennen perinteisen käyttöönotettavan automaatiojärjestelmän toiminnan verifioimista tapahtuvaksi testaamiseksi. Määrittelyä on sittemmin tarkennettu ja virtuaalisen käyttöönoton käsitettä hieman laajennettu. Virtuaalisen käyttöönoton projekteista on tunnistettavissa kolme toisiinsa liittyvää kokonaisuutta [17]:

1. Mekaaninen suunnittelu (sisältäen toimilaitteet, anturit ja järjestelmän toiminnallisuuden kuvauksen)
2. Laitteen/laitteiston ohjaus (sisältäen sisäänmeno ja ulostulo signaalien hyödyntämisen)

### 3. Signaaliliitynnät toimilaitteiden/anturien sekä ohjausjärjestelmän välillä

Kuvassa 2 on esitetty virtuaalisen kaksosen avulla tuotettu informaatio eri vaiheissa tuotteen elinkaarta. Virtuaalisella käyttöönotolla tavoitellaan kaikkia edellä mainitussa kuvassa esitettyjä hyötyjä keskittyen kuitenkin pääasiassa yllä listattujen kolmen asian toimintaan saattamiseen. Käytetystä järjestelmästä ja ohjelmista riippuen voidaan jo ennen todellista laitteiston käyttöönottoa pyrkiä optimoimaan tuotantoa, mikäli virtuaalisesta mallista pystytään simuloimalla toteamaan ongelmallisia kohtia. Usein tämä kuitenkin jää todellisen käyttöönoton jälkeen toteutettavaksi, virtuaalista kaksosta mahdollisesti hyödyntäen. [11, 17]

Jotta nämä saavutetaan ja virtuaalista käyttöönottoa päästään toteuttamaan, on oltava käytössä simuloitava 3D-malli suunnitellusta laitteistosta. Tähän 3D-malliin on pystyttävä lisäämään laitteen tarkat geometriat ja kinematiikka, lisäksi 3D-mallin tulisi vastata toteutettavaa laitteistoa sijoittelultaan ja ympäristöltään mahdollisimman tarkasti. 3D-mallin liikkeitä on myös pystyttävä ohjaamaan ulkoisilla signaaleilla. Jotta virtuaalinen käyttöönotto vastaa todellista tilannetta, on hyvissä oltava tiedossa laitteistolta vaaditut toiminnot, haluttu toimintasekvenssi sekä riippuvuudet muista prosesseista. On lisäksi päätettävä millaisella ohjausratkaisulla virtuaalimallia ohjataan virtuaalisen käyttöönoton aikana sekä miten signaalit välitetään mahdollisimman todenmukaisesti ohjaavalta laitteistolta virtuaalimallille. Virtuaalisella käyttöönotolla automaatiojärjestelmän toteutusta päästään suunnittelemaan jo huomattavasti aiemmin ja ennen ylimääräisen laitteiston hankkimista. [12] Tällöin on myös mahdollista toteuttaa jo aikaisessa vaiheessa FAT:a vastaava testi, jossa asiakkaalle esitellään simuloidun mallin toimintaa suhteessa asetettuihin vaatimuksiin. Tällöin saadaan aikaisessa vaiheessa palautetta, mikäli jotkin toiminnot on ymmärretty väärin tai, mikäli asiakas kokee osan toteutuksen toiminnoista turhiksi. Moni toiminto voi tuntua suunnittelevalle taholle olennaiselta, mutta asiakas kokee ne pahimmassa tapauksessa vain haittaavan laitteiston sujuvaa toimintaa. Tällöin niistä on hyvä luopua ja kunnioittaa asiakkaan vaatimuksia mahdollisimman tarkkaan ja aikaisessa vaiheessa. Projektikohtaisesti on kuitenkin määritettävä, kuinka laaja virtuaalinen FAT on mahdollista toteuttaa luotettavasti. Asiakkaan teollisuudenala sekä luottamus virtuaalisen mallin avulla toteutettuun simulointiin vaikuttavat myös suuresti virtuaalisesta FAT:sta saataviin hyötyihin.

Virtuaalinen käyttöönotto aloitetaan ilman fyysistä laitteistoa täysin luvussa 3.2.1 esitettyjä HIL- tai SIL-simuloinnin konsepteja mukaillen. Siirryttäessä lähemmäs todellista käyttöönottoa ja laitteiston valmistuessa voidaan siirtyä ottamaan esimerkiksi yksitellen todellisia komponentteja käyttöön. Voidaan varmistua siitä, että liikesuunnat ovat oikein päin ja laitteisto on asennettu oikein. Tärkeimpänä ominaisuutena tällöin päästään toteuttamaan, mikäli virtuaalimallin ja todellisen komponentin liikkeissä on poikkeamia. Laitteistoasennukset olisi tällöin mahdollisuuksien mukaan hyvä tehdä siinä järjestyksessä, että ohjausmenetelmien kannalta kriittisimmät osiot päästäisiin testaamaan ensimmäisinä. Kun ohjausjärjestelmällä ohjataan sekä virtuaalista mallia laitteistosta, että todellisia

laitteita voidaan puhua Dominka et. al. [20] esittelemästä hybridikäyttöönnoton konseptista. Tässä konseptissa siirrytään hiljalleen HIL-simuloinnista kohti lopullista laitteiston käyttöönottoa. Tällä tavalla kriittisten toimilaitteiden oikeanlaisesta toiminnasta saadaan täysi varmuus jo ennen niiden liittämistä ohjaamaan oikeata laitteistoa. Myös käyttöönottoon kulunut aika pienenee huomattavasti, sillä laitteiston komponentteja ja niiden välisen kommunikaation toimivuutta voidaan testata normaalia aiemmin. Jokaista todellista komponenttia päästään testaamaan yksinään, jolloin mahdollinen muiden komponenttien vaikutus näiden toimintaan voidaan eliminoida. Anturien toiminta voidaan testata siten, että aktivoitumisesta aiheutuva toisen toimilaitteen ohjausliike toteutetaan vain virtuaalisesti. Tällöin saadaan varmuus siitä, että todelliset anturit toimivat ja toteuttavat halutun liikkeen ilman kaikkien komponenttien olemassaoloa. Hybridikäyttöönnotossa on lisäksi vielä vaihe, jossa tuotantolinjalla liikuteltavia tuotteita visualisoidaan esimerkiksi lisätyn todellisuuden (*Augmented Reality*, AR) avulla. Tällöin simuloidut tuotteet voidaan visualisoida lopulliseen tuotantoympäristöön, jolloin simuloitujen tuotteiden ja todellisen tehtaan yhteistoimintaa voidaan tarkastella paremmin. [21]

## 4. TUOTTEEN ELINKAAREN HALLINTA

Pohjimmiltaan tuotteen elinkaarihallinnan (*Product lifecycle management, PLM*) tarkoituksena on alentaa tuotteen kustannuksia sekä kehittää suunnitellun tuotteen tuottamaa arvoa sekä asiakkaalle, että tuottajalle. [22] Tässä luvussa käsitellään tuotteen elinkaaren hallinnan vaikutuksia ja sitä, miten virtuaalinen käyttöönotto vaikuttaa ja tulee mukaan tuotteen elinkaarihallintaan. Myös erilaisia vaihtoehtoja virtuaalista käyttöönottoa varten tuotetun mallin hyödyntämiseen käydään läpi. Tämän työn käytännön osuudessa keskitytään etenkin uuden tuotteen suunnitteluun ja tuotekehitykseen sekä näihin käytettyyn kokonaisuuteen, nollasta aina käyttöönottoon asti. Tuotteen elinkaarihallinnan kannalta tarkastellaan etenkin näitä vaiheita, sekä lisäksi tuotteen tilannetta käyttöönoton jälkeen.

### 4.1 Elinkaaren ja elinkaarihallinnan vaiheet

Globalisaatio on johtanut siihen, että pienimmillään yrityksillä on maailmanlaajuista kilpailua. Halvemmalla myytävästä vastaavasta tuotteesta on mahdotonta heti tietää mistä halvempi hinta johtuu. Kilpailijan parempaan hintaan tai suorituskykyyn on pystyttävä vastaamaan, jolloin on oltava innovatiivisempi, kehitettävä parempia tuotteita nopeammin ja pienemmillä kustannuksilla. Asiakkaiden levittäytyessä myös tuotteen valmistajan on oltava useammassa paikassa ja ymmärrettävä eri asiakassegmenttien erilaiset vaatimukset tuotteelta. Mitä samalta tuotteelta vaaditaan ja miten tuotteen hinta sekä kustannukset muuttuvat eri paikoissa. [22]

Yritys myy aina jotakin tuotetta, joita voi tuoteperheeseen kuulua useampiakin. Lopulta yrityksen tulos riippuu siitä, miten hyvin tuotteita pystytään myymään. Tuote itsessään voi olla hyvin erilainen yrityksen toimialasta riippuen. Mikäli tuote on ihmisen valmistama, se omaa jonkin geometrian, toteuttaa funktiota käyttäjälleen ja sillä on tunnistettavissa oleva elinkaari, voidaan kyseinen objekti PLM:n näkökulmasta laskea tuotteeksi. Tuotteita on käytännössä siis rajaton määrä erilaisia ja jokaisen elinkaari on yksilöllinen. [3] Tuotteen elinkaari voidaan Starkin [22] mukaan jakaa viiteen perusvaiheeseen, jotka hän määrittää seuraavasti: kuvittelu (*imagination*), määritteleminen (*definition*), toteutus (*realisation*), tuki/käyttö (*support/use*) ja vetäytyminen/hävitys (*retire/dispose*). Tähän voidaan vielä lisätä erillisenä huolto osaksi tukea ja käyttöä sekä kierrätys elinkaaren loppuun. Elinkaaren eri vaiheissa eri henkilöt ja osastot ovat vastuussa tuotteesta, esimerkiksi sen kustannuksista ja toiminnan takaamisesta. Mitä useampi henkilö siirtää vastuun seuraavalle elinkaaren edetessä, sitä helpommin yritys menettää hallinnan näihin tuotteeseen liitettyihin ominaisuuksiin. Tämän työn kannalta merkittävin on tuotteen suunnittelu tai kehitysvaihe, jossa hallinnan menetys voi johtaa aikataulun pidentymiseen sekä budjetin ylittämiseen. Lisäksi ongelmana on määrittelemisen ja toteutuksen välissä tuotteen ja alkuperäisten asiakasvaatimusten vastaavuus. Tämä voidaan havaita mahdollisesti

myös vasta käyttövaiheessa, jolloin asiakas ei ole tyytyväinen tuotteen suorituskykyyn. Asiakasvaatimusten ymmärtäminen on olennainen osa markkinoille tuloajan nopeuttamisessa, mutta liian nopea tuotekehitys voi aiheuttaa takaisinkutsuja jälkeenkäin. [22] Grieves [3] jakaa PLM:n puolestaan neljään osioon: muodostus (*create*), toteutus (*build*), tuki (*support*) ja hävitys (*dispose*). Sinällään jako ja PLM:n toiminnallisuus pysyy samana, mutta Grieves korostaa valmistuksen suunnittelun (pääpaino toteutusvaiheessa) ja tuotesuunnittelun välistä yhteistyötä. Tällä yhteistyöllä iteratiivisesta prototyypikeskeisestä suunnittelusta pyritään eroon ja korvaamaan prototyyppien kehitykseen haaskatut resurssit aiemmin ja nopeammin tuotetulla informaatiolla. Jotta tuotteen tarkat määrittelyt voidaan tehdä, on ymmärrettävä näiden saavuttamiseen tarvittavat valmistuksen aikaiset operaatiot. Jakamalla aikaisessa vaiheessa tietoa siitä, mitä on mahdollista toteuttaa ja mitä ei, voi säästää suuren määrän aikaa ja resursseja.

Tuotteeseen liittyvän tiedon hallitseminen koko kyseisen tuotteen elinkaaren ajan mahdollistaa tarkan tiedon tuotteen tämän hetkisestä tilasta ilman fyysisen tuotteen omistamista. PLM:n avulla eri elinkaarivaiheissa kerättyä informaatiota pyritään yhdistämään jo etukäteen tulevaan vaiheeseen. On tärkeää, että yksittäisestä tuotteesta on yksilöllistä informaatiota, joka voidaan jakaa esimerkiksi tuotekehityksen ja tuotteen tukitoimintojen välillä. Tuotekehityksessä tuotettu informaatio vaikuttaa oleellisesti myös tuotteen hävittämiseen sekä luotettavuuden määrittämiseen. Tulevissa tuotekehitysprojekteissa pystytään hyödyntämään edellisten projektien tietoja esimerkiksi siitä, millaisia testejä ja muutoksia aiempaan tuotteeseen on tehty ja miksi. [3] Tällöin ei tarvitse toistaa samoja kokeiluja vaan voidaan suoraan hyödyntää aiemman tuotteen jotain toista toteutusversiota. Yhteistyö eri vaiheiden vastuuhenkilöstön välillä voidaan nähdä myös projektin sisäisenä motivaattorina, minkä avulla työvaiheita ei nähdä vain suoritettavina tehtävinä. Vuorovaikutus näiden välillä lisää näkökulmia, joiden avulla mahdolliset ongelmat nousevat paremmin esiin. Lopulta jokainen tuotevaihtoehto ja konsepti on oma tuotteensa ja mitä aiemmin ongelmallisista päästään eroon, sitä vähemmän ylimääräisiä kustannuksia syntyy. Pitämällä tuotteeseen liittyvän tiedon ajan tasalla käyttövaiheen aikana voidaan huoltotoimenpiteiden lisäksi luoda tuotteeseen uusia toiminnallisuuksia. Mikäli tuotteen elinkaaren aikana havaitaan merkittäviä puutteita, voidaan suunnittelua jatkaa ja osia päivittää missä elinkaarivaiheessa tahansa. Tämä käyttövaiheen aikana saatu tieto tuotteen toiminnasta voi osoittautua tärkeäksi myöhemmin toisen tuotteen kohdalla ja on siksi tärkeää saada luotettavasti linkitettyä tähän tuotteeseen. Yrityksen toiminnan tuottavuuden kannalta tallennettu tieto on tärkeä osa tuotteen huoltotoimintaa. Käytönaikaisen käyttäytymisen analysoimisella saavutetaan merkittävä etulyöntiasema huoltotoiminnan tarjoamiseen.

## 4.2 Elinkaarihallinnan hyödyt

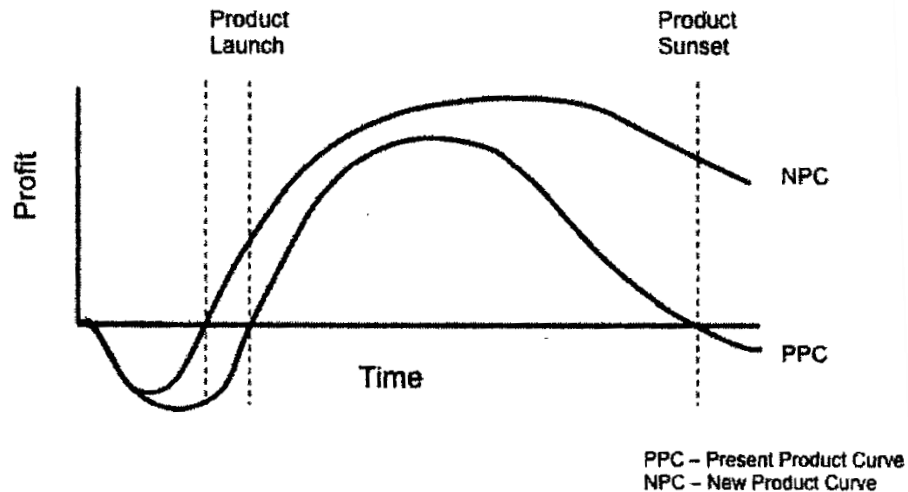
PLM:n suurimpana hyötynä on tuotteeseen liittyvä lisääntynyt informaatio. Tämän informaation avulla luodaan lisäarvoa sekä tuotteen valmistajalle, että käyttäjälle. Informaatiota pyritään jakamaan mahdollisimman paljon ja käyttämään kertaalleen tuotettua informaatiota uudestaan. Tuotetun informaation avulla tehostetaan tuotteiden hallintaa koko elinkaaren läpi, tuotekehityksen toimintoja, vähennetään tuotteeseen liittyviä kustannuksia ja tuotetaan kokonaiskuva siitä, mitä elinkaaren aikana tapahtuu. [22] Konkreettiset ja mitattavissa olevat hyödyt, joita PLM:n avulla pääasiassa tavoitellaan, ovat jaettavissa neljään kategoriaan; taloudellinen suorituskyky, ajansäästö, laadun parantaminen sekä liiketoiminnan kehittäminen. Liikevaihtoa pyritään parantamaan aikaistamalla tuotteen julkistamista sekä vähentämällä tuotekehitykseen sitoutuneita kuluja. Toteuttamalla oikeita asioita oikeaan aikaan pyritään vähentämään projektiin käytettyä kokonaisaikaa sekä vähentämään tuotesuunnittelun eri prosessien välisiin muutoksiin käytettyä aikaa. Vähentämällä valmistus- tai tuotantoprosessin virheitä pyritään parantamaan tuotteiden laatua. Vähentäen näin asiakasreklamaatioiden sekä tuotepalautusten määrää. Liiketoiminnan kehittämisellä viitataan puolestaan innovaatiokeskeisyyteen, tuotteiden ja tuotetietojen uudelleen hyödyntämiseen sekä tuotteiden ja toimintojen yhdenmukaistamiseen. [22]

Tämän tutkimuksen kannalta olennaisimmat hyödyt ovat tuotekohtaisten kustannusten vähentäminen, tuotekehityksen kehittäminen sekä tuotteessa olevien virheiden vähentäminen. Kuten aiemmin luvussa 3.1 mainittiin, aiheuttavat ohjelmointi- ja ohjelmistovirheet suunnitteluprojektiin käytetyssä kokonaisajassa keskimäärin 9,5 – 13 % lisäyksen. [9] Tuotteen laadun voidaan olettaa paranevan virheiden määrän vähentyessä. Lisäksi virheet voivat aiheuttaa ajallisten korjauskustannusten suuriakin muutoksia itse tuotteeseen. Näiden muutosten aiheuttamat kustannukset voivat tuotteen elinkaaren vaiheesta riippuen nousta todella suuriksi. Tuotekehitys pyritään täten suorittamaan mahdollisimman tehokkaasti eri toimijoiden välisellä yhteistyöllä, hyödyntäen aiemmin tuotettua informaatiota mahdollisimman hyvin.

Kuvassa 8 on havainnollistettu kahden eri tuotteen elinkaarta liikevoiton funktiona. Merkinällä PPC on ns. nykyinen tuote, jonka kehityksessä ei ole hyödynnetty PLM konsepteja ja merkinällä NPC puolestaan tuote, jonka kehityksessä näitä on hyödynnetty. Tehokkaammalla informaation hyödyntämisellä tuotteen NPC kehityskustannukset pyritään pitämään matalina ja etenkin lyhentämään ajanjaksona, jona nämä kehityskustannukset syntyvät. [3]

# Product Lifecycle

## PLM Profitability Curve



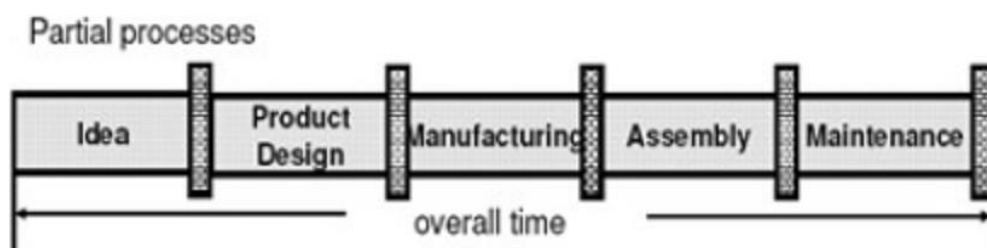
**Kuva 8.** *Elinkaarihallinnan vaikutus tuotteen elinkaareen [3]*

Kuvassa 8 havainnollistetun uuden tuotteen aiemmalla julkaisulla pyritään pääsemään ensimmäisinä markkinoille, millä voidaan joskus ratkaista menestyvän ja epäonnistuvan tuotteen välinen ero. Kuvasta ei täysin käy selväksi alun tuotekehityskustannuksissa syntyvä ero, sillä PLM konsepteja mukaillessa kustannukset voivat syntyä nopeammin kuin nykyisen tuotteen kohdalla. Tämä siitä syystä, että useampaa asiaa voidaan tehdä rinnakkain samanaikaisesti, jolloin kustannukset syntyvät myös samanaikaisesti. Lisäksi alkuvaiheessa saatetaan toteuttaa enemmän testejä ja verifiointeja verrattaessa nykyiseen tuotteeseen. Elinkaaren loppuvaiheessa on havainnollistettu tuotteeseen pidettyä yhteyttä, jolla tuottaja voi tarjota asiakkaalle palveluita aina tuotteen hävittämiseen saakka, tuottaen näin tuloja itsellensä. Grieves arvioi kirjassaan [3], että valmistusvaiheeseen saakka voidaan säästää noin 25 – 35 % kustannuksissa sekä, riippuen myöhemmissä vaiheissa hyödynnettävistä tulonlähteistä, elinkaaren lopulla vielä lisää. PLM kustannusten ja sitä kautta myös säästöjen arvioiminen on kuitenkin erittäin vaikeaa ja täysin projekti ja yritys kohtaista, riippuen PLM konseptien laajuudesta ja tuotteesta itsestään.

### 4.3 Virtuaalinen käyttöönotto osana tuotteen elinkaarihallintaa

Virtuaalinen käyttöönotto on osa tuotteen elinkaarihallinnan ajatusta hyödyntää virtuaalisia malleja läpi tuotteen elinkaaren. Virtuaalinen käyttöönotto poikkeaa monista muista

virtuaalimallien konsepteista siinä, että virtuaalinen vastine luodaan aina jo ennen fyysisen tuotteen olemassaoloa. Yhdistettäessä virtuaalinen käyttöönotto osaksi PLM-konseptia voidaan puhua myös simulaatioavusteisesta suunnittelusta. Toisaalta käyttöönoton jälkeen virtuaalisen käyttöönoton avulla luotua mallia voidaan hyödyntää ainakin käyttöhenkilöstön koulutukseen, laitteiston etämonitorointiin ja diagnosointiin. Tällöin virtuaalisen käyttöönoton avulla on tuotettu tuotteen elinkaaren myöhempiin vaiheisiin keinoja hyödyntää olemassa olevaa informaatiota PLM käytännön mukaisesti. [21] Parhaiten varsinaisen virtuaalisen käyttöönoton ajatusmaailma soveltuu tuotantolaitosten ja monimutkaisten mekatronisten laitteistojen mallintamiseen ja simulointiin. Verrattaessa perinteiseen suunnitteluprosessiin, jossa helposti tehtävät projektin sisällä tehdään osakokonaisuus kerrallaan, virtuaalinen käyttöönotto tuo enemmän iterointia. Kuvassa 9 on havainnollistettu tyypillistä tilannetta, johon suunnitteluprojektissa voidaan ajautua. Kuvassa suunnitteluprojektin eri vaiheet ovat toinen toistensa jälkeen ja näiden välissä on ”seinä”, jonka yli projektin tehtävät siirtyvät osastolta toiselle. Tällä pyritään havainnollistamaan osastojen välistä liian vähäistä kommunikointia ja yhteistyötä. Luvussa 3.1 kuvassa 3 on samaa ongelmaa havainnollistettu sisältäen kuitenkin hieman enemmän yhteistyötä ja rinnakkaisuutta eri toimijoiden välillä. Kuva 3 on myös yksityiskohtaisempi keskittyen enemmän käyttöönottovaiheeseen. Molemmissa kuvissa suunnitteluprosessi noudattaa kuitenkin pitkälti peräkkäissuunnittelun periaatetta (*Sequential Engineering*), jossa seuraava vaihe ei voi tapahtua ennen edellisen vaiheen toteutumista. Mitä laajemmasta projektista on kyse sitä helpommin eri osastot toimivat itsenäisesti, muiden osastojen siirtyessä jo toisiin projekteihin.



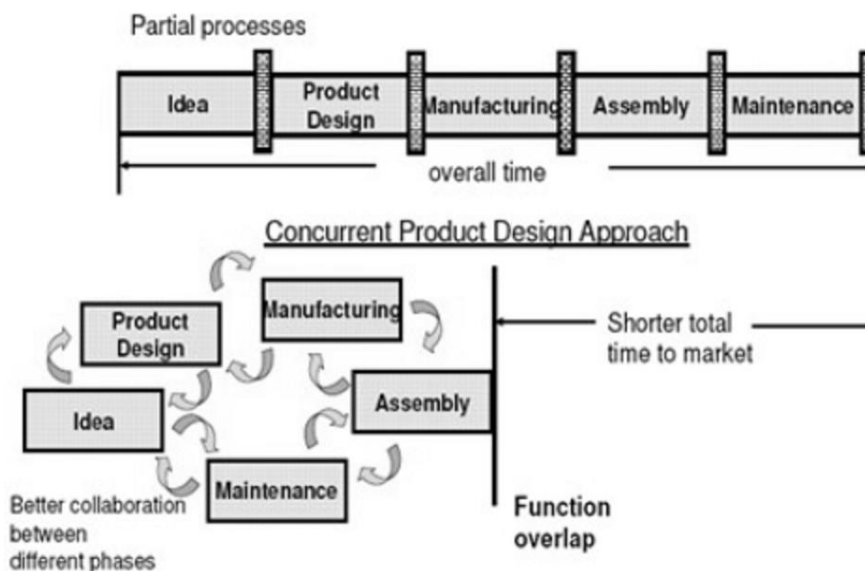
**Kuva 9.** Suunnitteluprojektin vaiheistus eri toimijoiden välillä [23]

Virtuaalisella käyttöönotolla pyritään lisäämään eri suunnitteluosastojen välistä yhteistyötä ja kommunikointia, sillä tuotteen eri elinkaaren vaiheissa on helpompi havaita tähän vaiheeseen liittyviä tyypillisiä ongelmia. Mitä aiemmin konsepti saadaan kaikkien tahojen nähtäville ja kommentoitavaksi, sitä paremmin ja aiemmin kaikilla on mahdollisuus vaikuttaa suunnittelun lopputulokseen. Jo 90-luvulla ensimmäisen kerran esitelty konsepti rinnakkaissuunnittelusta (*Concurrent Engineering, CE*) toi huomattavaa parannusta kuvan 9 esittämään toimintatapaan. [24] Virtuaalinen käyttöönotto soveltaa rinnakkaissuunnittelun periaatetta helpottaen eri tahojen välistä kommunikointia entisestään.



### 4.3.1 Rinnakkaissuunnittelu

Rinnakkaissuunnittelun tärkeimpänä tarkoituksena on samanaikainen työskentely useiden eri suunnitteluvaiheiden parissa. CE:lle voi olla useampiakin termejä käyttökohteesta riippuen (esim. *Simultaneous Engineering*, *Concurrent Product Development*), joilla kuitenkin painotetaan juuri edellä mainittua tarkoitusta. CE:n kaksi muuta olennaista elementtiä ovat: osanottajien aikainen osallistuminen ja menettelytapa, jossa toimitaan yhtenä ryhmänä. CE:n ensimmäinen määritelmä on: ”*Rinnakkaissuunnittelu on systemaattinen menettelytapa integroituun, rinnakkaiseen tuotteiden ja niihin liittyvien prosessien, kuten valmistus- ja tukiprosessit, suunnitteluun. Tämän menettelyn on tarkoitus saada alkusuunnitteluun osallistuvat henkilöt miettimään kaikkia tuotteen elinkaaren elementtejä, kuten laatu- ja kustannuksia, aikatauluja sekä käyttäjävaatimuksia, konseptoinnista tuotteen hävittämiseen saakka.*” [24] Eri alueiden toimijoiden tuominen yhteen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa projektia aikaistaa erilaisten tulkintojen käsittelyä. Työryhmän eri henkilöt keskittyvät omaan alueeseensa ja tarkastelevat projektia tältä kantilta, jolloin tällaisia käsityseroja varmasti syntyy. Normaalisti nämä käsityserot tulisivat esille vasta myöhemmässä vaiheessa ja kyseessä oleva tuote jouduttaisiin pahimmassa tapauksessa suunnittelemaan uudestaan tai ainakin tuotteeseen jouduttaisiin tekemään muutoksia. Kuvassa 10 on esitetty vertailu aiempaan kuvaan 9. Kuvaan on lisätty CE:n periaatteella toteutettu suunnitteluprojekti ja saavutettuja tuloksia havainnollistetaan lyhentyneellä markkinoille tuloajalla.



Kuva 10. Rinnakkaissuunnittelun menettelytavan hyötyjä [23]

Kuvassa 10 eri suunnitteluvaiheiden osajien paremmalla yhteistyöllä on pyritty vähentämään edellä mainittuja näkemyseroja kehittämällä tuotetta aikaisessa vaiheessa eri nä-

kökulmista. Näitä eri näkökulmia arvioimalla tuotteelle tärkeimmät ominaisuudet saadaan priorisoitua ja käytettävissä oleva informaatio hyödynnettyä tehokkaammin. [25] Tuotteiden mennessä entistä monimutkaisemmiksi myös osaaminen hajautuu entistä laajemmalle alueelle, jolloin entistä tärkeämmäksi muodostuu yhteistyössä toteutetun suunnittelun mahdollistaminen. Suunnittelun tukena olevilla ohjelmistoilla on saatava tieto samaan aikaan kaikille suunnitteluun osallistuville tahoille ja olisi vielä varmistuttava yhteisymmärryksestä. Tämän hetken haasteena onkin luoda virtuaalisen ja lisätyn todellisuuden malleja, joita olisi mahdollista käsitellä samanaikaisesti useammasta sijainnista. Tavoite on parantaa entisestään yhteistoimintaa organisaation sisällä, toimittajien ja asiakkaiden välillä sekä aikaistaa ja lähentää suunnittelutoimijoiden välistä kommunikointia. Lisääntyvä informaation määrä ja aikataulujen tuottamat paineet pakottavat pakkaamaan informaation mahdollisimman tiiviiseen pakettiin. Virtuaalinen malli, joka on kaikkien osallistujien käytettävissä kaiken aikaa, olisi tähän yksi vaihtoehto. Virtuaalisen tai lisätyn todellisuuden malli mahdollistaa yksittäisen henkilön vuorovaikutuksen mallin kanssa, jolloin kirjallisen informaation välittäminen suunnittelutahojen välillä ei kasva samassa suhteessa informaation määrän kanssa. [26]

#### **4.3.2 Virtuaalinen käyttöönotto ja simulaatioavusteinen suunnittelu**

Suunnittelu lähtee liikkeelle projektikohtaisista vaatimuksista, joiden taustalla on asiakkaan tai tuotteen loppukäyttäjän arvottamat asiat. Vaatimusten täyttämistä vaikeuttaa monet suunnittelussa huomioitavat asiat kuten turvallisuus ja kustannukset. Vaikeuksia tuottaa myös suunnitteluprojektin aikana tapahtuva varmistuminen siitä, että vaatimukset voidaan saavuttaa. Tuotteeseen suunnittelun aikana tehty muutos voi vaikuttaa sen toimintaan suhteessa yksittäiseen vaatimukseen. Myös vaatimukset voivat kehittyä suunnittelun edetessä ja onkin oltava selkeä käsitys tuotteen tärkeimmistä vaatimuksista koko suunnitteluprojektin ajan. Simulaatiomallit voivat tuoda lisäarvoa vaatimusten verifiointissa. Simulaatiomalleilla pystytään havainnollistamaan suunnitellun tuotteen toimintaa, jolloin myös sen toiminnan vastaavuutta määritettyihin vaatimuksiin voidaan käydä läpi. Pitämällä säännöllisin ajoin palaverieita, joissa käydään asiakkaan kanssa läpi tuotteen vaatimukset, voidaan simulaatiomalleilla selkeästi osoittaa, mihin tuote tällaisena pystyy. Tuotteen elinkaaren alkuvaiheessa luodut digitaaliset kopiot tuotteesta (*Digital Mockup Unit, DMU*) ovat halpoja prototyyppisiä, joilla pyritään juuri tällä tavoin havainnollistamaan tuotteen toiminnot jo aikaisessa vaiheessa. Aiemmin DMU:t käsitettiin 3D-malleiksi, joilla havainnollistettiin eri osien sopivuus toisiinsa. [3] Nykyisten digitaalityökalujen avulla voidaan DMU:t ymmärtää simuloituiksi prototyypeiksi, jotka toteutetaan esimerkiksi yhtä käyttötapausta varten. Tällöin eri ratkaisuja voidaan testata nopeasti ja turvallisesti sekä esittää sama asia myös asiakkaalle. DMU simulaatioiden hyödyntäminen on hyvin lähellä luvussa 4.3.1 esiteltyjä virtuaalitodellisuuden käytäntöjä.

Kuvassa 11 on esitetty Aberdeen Group:n [15] tekemän tutkimuksen tuottama tulos, jossa tutkittiin mekatronisten konseptien toteuttamista fyysiseksi tuotteeksi. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että prototyyppien määrän vähentäminen keskimääräisestä 6,9 prototyyppistä (tutkittu erillisessä saman yrityksen tekemässä tutkimuksessa [27] ja päädytty tähän lukuun) yhteen hyödyntämällä simulointia osana suunnitteluprosessia, vähentäisi kustannuksia ja projektiin käytettyä aikaa keskimäärin 37 prosentilla. Tutkimuksessa käytetty 6,9 keskimääräisen prototyypin lukema jokaista suunnitteluprojektia kohden riippuu paljolti tutkimuksessa käytettyjen yritysten toimialasta, eikä täten ole täysin vertailukelpoinen kaikkiin suunnitteluprojekteihin. On kuitenkin selvä, että vähentämällä prototyyppien määrää lähemmäs nollaa vähentää ylimääräisten materiaali, energia ja työvoimakulujen aiheutumista merkittävästi.

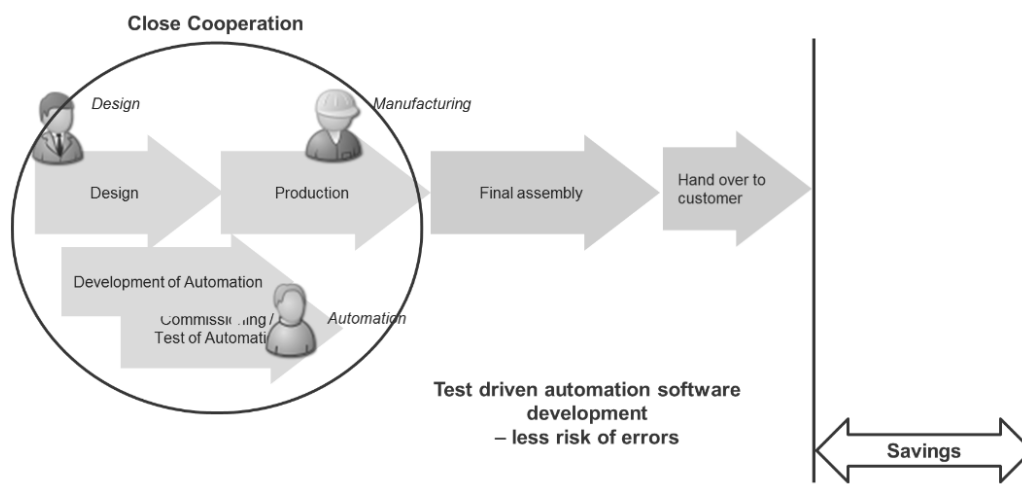
Product Complexity	One Prototype		6.9 Prototypes		Average Savings of a 37% Reduction	
	Time Required	Cost	Time Required	Cost	Time Saved	Cost Saved
Low	13 days	\$7,600	90 days	\$52,516	33 days	\$19,449
Moderate	24 days	\$58,000	166 days	\$400,780	61 days	\$148,423
High	46 days	\$130,000	317 days	\$898,300	118 days	\$332,673
Very high	99 days	\$1,200,000	683 days	\$8,292,000	253 days	\$3,070,825

**Kuva 11.** Prototyyppien vähentämisen tuottamia säästöjä [15]

Paine tuottaa uusia tuotteita nopeammin ja vähemmällä kustannuksilla ajaa yrityksiä muuttamaan tuotekehityskäytäntöjään ja hyödyntämään esimerkiksi simulaatioita. Suurimpia tekijöitä tuotekehityksen kehittämiseen on markkinoille tuloajan lyhentäminen. Tämä siitä syystä, että halutaan osuus uusista markkinoista tai julkaista uusia tuotteita ennen kilpailijoita. Markkinoille tuloajan lyhentäminen ajaa suunnittelun entistä tiukemmalle ja suunnittelun aikana ei välttämättä ehditä täysin arvioida tuotteen tai laitteiston todellista suorituskykyä. Tutkimuksessa [15] todettiin, että yritykset, joissa hyödynnetään simulaatioita tuotteen optimointiin saavuttavat tuotteen julkaisulle asetetut aika tavoitteet 3,2 kertaa useammin kuin heikoimmat yritykset. Lisäksi nämä yritykset pysyvät tuotekehitysbudjetin sisällä kaksi kertaa useammin kuin tutkimuksen heikoimmat yritykset. Suurimmiksi haasteiksi kehittää tuotteen suorituskykyä tutkimuksessa todettiin tuotteen tai laitteiston todellisen toiminnan ennustaminen, suunnittelupäätösten tuottamat kustannus- ja aikavaikutukset sekä virheiden liian myöhäinen havaitseminen.

Verrattaessa rinnakkaissuunnittelusta esitettyjä hyötyjä virtuaalisen käyttöönoton vastaaviin, havaitaan selkeitä samankaltaisuuksia. Kuvassa 12 on esitetty päivitetty versio kuvan 3 suunnitteluprojektista, alla esitettävässä kuvassa esitetyt säästöt on saavutettu verrattaessa siis tähän aiempaan käytäntöön. Verrattaessa puolestaan kuvaan 10 voidaan havaita vastaava lopputulos markkinoille tuloajan lyhentymisenä. Se, että nimitetäänkö kuvassa 12 esitettyä käytäntöä virtuaaliseksi käyttöönotoksi vai simulaatioavusteiseksi

suunnitteluksi ei ole olennaista. Tärkeintä on pyrkimys tehokkaampaan suunnitteluprosessiin, jossa virtuaalisia malleja hyödynnetään alusta alkaen aina käyttöönottoon asti. Tiukempi yhteistyö eri toimijoiden välillä tuottaa aiemmassa vaiheessa iterointikierroksia tuotteen suunnitteluun. Tätä voidaan toteuttaa juuri näiden aiemmin mainittujen simulointimallien ja DMU:en avulla. Tällöin on mahdollista muuttaa tuotteesta saatavia tuloja kuvan 8 mukaisesti, riippuen toki näiden konseptien toteutuksen laajuudesta sekä projektista.



**Kuva 12.** Virtuaalisen käyttöönoton ja suunnitteluyhteistyön hyödyt [13]

Toisaalta malleja voi hyödyntää PLM käytäntöjen mukaisesti myös suunnitteluvaiheen jälkeen. Suunnitteluvaiheessa virtuaalisen käyttöönoton mallin jakaminen systemaattisesti osiin voi tulla oleelliseksi eli mallinnetaan esimerkiksi monimutkainen osio. Käyttöönotto vaiheen loppupuolella voidaan mallintaa myös osio, josta voi tulevaisuudessa olla hyötyä esimerkiksi, mikäli virtuaalista mallia hyödynnetään käyttäjäkoulutus tai vi-  
anmääritys tehtäviin. Kuvassa 5 on esitetty integroidun virtuaalisen käyttöönoton täh-  
täimeen kuuluvat suunnitteluprojektin vaiheet. Kuvasta puuttuu rastit ainakin kohdista  
2.1 ja 3.3, joihin ne voidaan edellä esitettyjä konsepteja hyödyntäen myös lisätä.

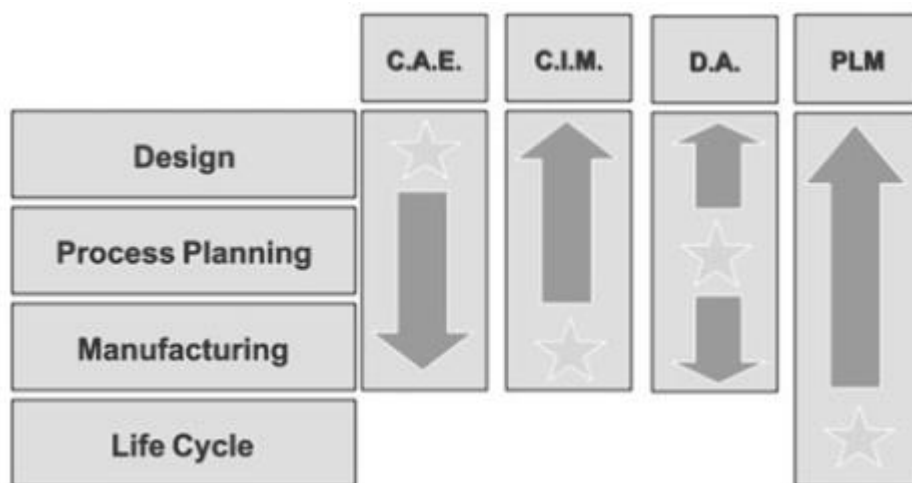
## 5. MALLINNUS- JA SIMULOINTIYMPÄRISTÖ

Työn käytännön osuudessa käytettiin Siemensin NX10-mallinnusympäristöä virtuaalimallin muokkaukseen ja simulointiin. Mallinnustyö pyrittiin tekemään yrityksen normaaleja toimintotapoja noudattaen ja osana mekaniikka- ja automaatio suunnittelun työnkulkua. Tästä syystä varsinainen mallinnus oli mekaniikkasuunnittelun vastuulla ja tehtiin tässä tapauksessa käyttäen Solidworks-mallinnusympäristöä. Työssä ei esitellä Siemens NX-ohjelman mallinnustoiminnallisuuksia tarkemmin vaan keskitytään ainoastaan simulointipuoleen. Tässä luvussa esitellään käytetyn ohjelman toimintaperiaatteet ja simulointiin käytettävät työkalut. Perinteisten suunnittelussa hyödynnettävien 3D-mallinnustyökalujen ja termien perusteet käydään myös läpi. Osana simulointiympäristöä käsitellään myös tiedonsiirtoon käytetty OPC-standardi. OPC-standardia hyödynnettiin simulointiohjelmiston ja automaatiojärjestelmän ohjaukseen käytetyn PLC:n välillä. Varsinainen virtuaalinen käyttöönotto toteutettiin Mechatronics Concept Designer-lisäosan ja tämän PLC:n avulla.

### 5.1 Mallinnusohjelmistot suunnittelussa

Perinteinen valmistusprojektin työkulku voidaan yleistää kulkevan siten, että ensin suunnitellaan tuote tai tuotelinja, siirrytään valmistuksen prosessisuunnitteluun ja sitten itse valmistukseen. Myös suunnittelun työkalut muotoutuivat tähän ympärille samalla idealla. Suunnittelun tukena on tietokoneavusteinen suunnittelu, *Computer Aided Design (CAD)*, joka monesti ymmärretään 2- tai 3D-piirrosten tekemiseksi ja muotojen mallintamiseksi [28] CAD:n lisäksi tuli tietokoneavusteinen tekniikka, *Computer Aided Engineering (CAE)*, jolla viitattiin lähinnä muotoilijoiden tuottaman designin ja suunnittelun yhdistämiseen. Tuotetta analysoidaan siten, että muotoilija ja suunnittelija voivat molemmat suoriutua tehtävistään parhaalla mahdollisella tavalla. Erilaiset suunnittelun mitoituksen laskenta- ja simulointi-ohjelmat (esim. FEM) lasketaan mukaan CAE-ohjelmiin. Myös monikappaledynamiikan ja kinematiikan mallinnus ovat osa CAE-analyysityökaluja. [29] Valmistuksen ja valmistuksen prosessisuunnittelun tärkeä työkalu on *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*, jolla pyritään hallitsemaan suuria tuotevirtoja ja vähentämään kustannuksia valmistusprosessissa. Valmistuksen apuna käytetään myös tietokoneavusteista valmistusta, *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, jossa todellista kappaleen valmistusta mallinnetaan 3D-mallia hyödyntäen. CAM:n merkittävimpänä tarkoituksena on nopeuttaa valmistusta ja suunnitella kappaleiden valmistus virtuaalisesti. CIM:n suurimmat hyödyt ovat sellaisissa tuotantoprosesseissa, joissa käsiteltävien tuotteiden määrä on suuri ja tärkeimmäksi nousee valmistuksen oikeanlainen suunnittelu. Usein tuotteen muotoilu ja valmistusprosessi kulkevat käsi kädessä siinä mielessä, että monimutkainen muotoilu hankaloittaa valmistusprosessia. Tällöin CIM:n rooli kasvaa entisestään ja tuotteen

menestys riippuu kuluja ja aikaa säästävistä valmistuksen onnistumisesta. Näiden työkalujen käytön automatisointiin on olemassa lisäksi omia työkaluja, jotka kuuluvat usein termin *Design Automation (DA)* alle. Valmistustekniikka sekä vaatimukset määritellään, joista DA täsmentää valmistusprosessin ja tuotteen designin automaattisesti. DA:ta hyödynnetään erityisesti hyvin samankaltaisina toistuvien designien ja valmistusprosessien yhteydessä. Näiden termien sekä muiden vastaavien työkalujen muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan myös tietoperustaiseksi suunnitteluksi, *Knowledge-based Engineering (KBE)*, joiden kattamat osa-alueet on esitetty kuvassa 13. [28]



**Kuva 13.** Tietoperustaisen suunnittelun työkalujen sijoittuminen eri projektivaiheisiin [28]

Tietoperustaisen suunnittelun työkaluilla pyritään yhdenmukaistamaan ja integroimaan kuvassa 13 havainnollistettuja projektivaiheita. Edellisessä luvussa käsitelty PLM on näistä laajin ja se pyrkiikin yhdistämään kaikkien muiden tuottamat työkalut ja toiminnot järkevästi yhteen. Taustalla on pyrkimys mahdollisimman laajaan yhteistyöhön ja integraatioon näiden työkalujen välillä, jotta toisella saavutetut tulokset voitaisiin hyödyntää luontevasti toisessa. [3, 28] Tyypillinen käyttötapa voi olla esimerkiksi, että CAD-työkaluilla toteutettu malli hyödynnetään CAE-analyysiin ja tämän läpäistyään samaa mallia hyödynnetään CAM ja/tai CIM toiminnoissa. Tuotteen elinkaarihallinnassa pyritään hyödyntämään ja yhdistämään juuri näillä työkaluilla tuotettua informaatiota mahdollisimman monessa paikassa mahdollisimman tehokkaasti.

### 5.1.1 Siemens NX

Siemens NX on suunniteltu tarjoamaan CAD, CAE, CAM ja PLM palveluita yhden ohjelmiston avulla. Tässä työssä käytettiin NX:n versiota 10, joten mainitut toiminnallisuudet vastaavat tätä versiota. NX on karkeasti jaettavissa kolmeen pääosiin: NX suunnit-

teluun, NX simulointiin ja NX valmistukseen. Näistä ensimmäinen tarjoaa ratkaisuja konseptointiin, 3D-mallinnukseen ja dokumentointiin. Simulointiosuus kattaa rakenne, liike, lämpö, virtaus, monikappale ja optimisointiratkaisut. Valmistusosuus sisältää kappaleen valmistuksen olennaiset työkalut: koneistus- ja työstöohjauksen, työkalun määrittämisen sekä laaduntarkistuksen. Kaikki osa-alueet on toteutettu siten, että yksi malli toimii kaikissa työkaluissa. Tällöin malli joko luodaan NX:n mallinnustyökaluja käyttäen ja hyödynnetään simulointi, dokumentointi ja valmistus työkaluja siihen tai malli tuodaan NX:n käyttöön joltakin toiselta mallinnusohjelmalta.

NX:ssä on panostettu etenkin konseptointiin ja suunnittelun alkuvaiheiden helpottamiseen. Tämän lisäksi NX:ään on integroitu PLM toimintoja, joilla pyritään vähentämään tuotetietojen hakuun käytettyä aikaa. NX versioon 10 on päivitetty useita CAD, CAM ja CAE toimintoja, joissa voidaan esimerkiksi käyttää useampaa ratkaisijaa tehostamaan simuloinnin suorituskykyä. Myös tuotantolinjojen suunnitteluun on panostettu uudella Line designer-lisäosalla. NX:n tärkeimpiä piirteitä on CAD-riippumattomuus. Tarkoittaen, että muilla CAD-ohjelmistoilla toteutetut mallit on tuotavissa NX:n puolelle. [30]

## 5.2 Mechatronics Concept Designer-laajennus

Siemens NX-ohjelmistoon on olemassa *Mechatronics Concept Designer* -laajennus (MCD), joka on tarkoitettu ensisijaisesti konseptisuunnittelun avuksi ja sen varmentamiseen simuloimalla. Tämän työn käytännön osuus toteutettiin juuri tällä ohjelmistolla sekä Siemens TIA Portal automaatio-ohjelmistolla. MCD hyödyntää 3D-mallia, johon ohjelman avulla luodaan kinematiikkaominaisuuksia, antureita ja toimilaitteita sekä laitteen looginen toiminta. Näillä toiminnallisuuksilla validoidaan konseptin oikeanlainen toiminta, simulointia hyödyntäen, mahdollisimman aikaisessa vaiheessa suunnitteluprosessia. [31] Pohjimmiltaan MCD:n käytön tavoitteena on luoda parempilaatuisia tuotteita ja vähentää fyysisten prototyyppien määrää aivan minimiin. Suurimpana yksittäisenä hyötynä mahdollisten ongelmien ja virheiden aikaisempi havaitseminen, mitä aiemmin virheet ja toiminnallisuuksien puutteet havaitaan, sitä vähemmän ylimääräisiä kustannuksia ne aiheuttavat ja sitä aiemmin muutoksia päästään suunnittelemaan. MCD on kehitetty laitteiden testaamisen ja päätösten tekemisen nopeuttamiseen, sillä monimutkaisetkin laitteet ja laitteistot voidaan testata hyödyntäen virtuaalisia toimilaitteita ja antureita. Simuloitaessa mekaanista konseptia jo aikaisessa vaiheessa mahdollisia virheitä havaitaan ja todellisen toiminnon näkeminen auttaa lopullisen laitteiston kehitystyössä. [32] MCD:n avulla luodaan luvun 2.1 mukainen virtuaalinen todellisuus, jossa käyttäjä pystyy seuraamaan simuloinnin toimintaa haluamastaan kuvakulmasta. MCD:n virtuaalitodellisuudella pyritään mallintamaan todellisuutta vastaava ympäristö muokkaamalla esimerkiksi ympäristön putoamiskiihtyvyyttä ja kappaleiden kitkakertoimia. Simuloinnin toimintaan voidaan vaikuttaa monilla eri parametrien arvoilla sekä interaktiivisesti tarttumalla liik-

kuviin kappaleisiin kiinni. Simulointi on mahdollista pysäyttää välillä ja jatkaa tarkastelun jälkeen uudestaan. Lisäksi simuloinnin nopeutta on mahdollista sekä hidastaa että nopeuttaa suhteessa todelliseen nopeuteen.

Mechatronics Concept Designer on perinteisen NX:n päälle asennettava laajennusosa ja vaatii täten NX:n perusohjelman toimiakseen. Tällöin myös mallintaminen ja suunnittelu voidaan alusta lähtien toteuttaa samalla ohjelmistolla aina simulointiin asti. Kuten luvun 4 alussa mainittiin, alun suunnittelu ja mallinnus voidaan tehdä myös muilla 3D-ohjelmistoilla, ja MCD tukeekin tiedostotuonnissa yleisimpiä tiedostomuotoja. Tällä pyritään siihen, että MCD olisi käytettävissä mahdollisimman laajalla käyttäjäkunnalla sekä etenkin, että työvoiman paras mahdollinen osaaminen saataisiin hyödynnettyä, eikä ylimääräistä uuden opettelua tarvittaisi. MCD:n puolelle tuodaan siis 3D-malli joko erillisestä ohjelmistosta tai hyödynnetään NX:n avulla luotuja malleja. Ulkoa tuodut 3D-muodot menettävät kaikki niiden väliset rajoitteet (*Constraints*) ja simuloinnin kannalta kriittisimmät kappaleet on hyvä määrittää uudelleen suhteessa johonkin paikalleen kiinnitettyyn kappaleeseen. Rajoitteilla kappaleiden etäisyyksien tarkka muuttaminen onnistuu myös helpommin, jolloin on myös tarkka tieto kyseisen kappaleen sen hetkisestä sijainnista suhteessa määritettyyn kiintopisteeseen. Kaikille 3D-mallin komponenteille pystytään määrittämään erikseen kinemaattiset ominaisuudet; liitokset, liikkeet, kitka- sekä muut fysikaaliset ominaisuudet ja törmäysominaisuudet. MCD käyttää fysiikkamoottoriin NVidia PhysX-fysiikkamoottoria, joka monien muiden fysiikkamoottoreiden tapaan on alun perin kehitetty peliteollisuuteen. [32] Ajonaikaisesti optimoiduilla algoritmeilla havaitaan kappaleiden väliset törmäykset ja käsitellään kappaleita fysiikan lakien mukaisesti. Tällöin kappaleiden massa sekä muut fysikaaliset ominaisuudet voidaan huomioida simulaatiossa. Tästä johtuen törmäävien kappaleiden määrän kasvaessa myös laskennan määrä kasvaa. Onkin tärkeitä pitää mallissa samanaikaisesti liikkuvien kappaleiden määrä minimissään. [33]

Yksi Mechatronics Concept Designerin tavoite on tuoda sähkö-, mekaaninen- ja automaation suunnittelu lähemmäs toisiaan. MCD malliin voidaan lisätä antureita ja toimilaitteita tarkalleen niin, kuten eri suunnittelutoimijat ovat niiden ajatelleet todellisuudessa toimivan. Tällöin eri alojen ammattilaiset pääsevät näkemään ratkaisunsa toimivuuden ja keskustelemaan ratkaisuistaan toistensa kanssa normaalia aiemmin. Antureita määritettäessä ei oteta kantaa niiden toimintaperiaatteeseen. Tällöin tiettyyn paikkaan sijoitetun anturin toimintaa täytyy ajatella myös siltä kantilta, että soveltuuko ajatellun toiminnan omaava anturi tähän paikkaan vai onko valittava toimintaperiaatteeltaan toisenlainen anturi. Antureiden ja toimilaitteiden toiminnallisuus ja ohjaus voidaan toteuttaa joko MCD:n sisäänrakennetulla *Sequence Editor*-työkalulla tai ulkoisella ohjauksella OPC(*OLE for Process Control*)-yhteyden välityksellä projektin todellista ohjausteknologiaa hyödyntäen. Tarkemmin MCD:n toimintoja ja työkaluja on esitelty luvussa 5.3.2. Liitteessä A on kuvattu Siemensin tarjoama työnkulku MCD:a käytettäessä. Siinä on hyödynnetty *Sequence Editor*-työkalussa olevaa mahdollisuutta kääntää sillä tuotettu ohjaus



PLCOpen XML -formaattiin, jota sitten voidaan lukea suoraan PLC:n puolella. Tässä työssä luvussa 6 esiteltävässä projektissa tätä ominaisuutta ei päästy testaamaan, koska ohjausta aloitettiin toteuttamaan suoraan Siemensin TIA Portal ohjelmalla. Tällöin MCD:n puolella oli kontrolloitavat toiminnot ja liikkeet määritettynä ja ohjaus toteutettiin alun alkaen ulkoisella automaatiojärjestelmällä ja OPC-yhteydellä.

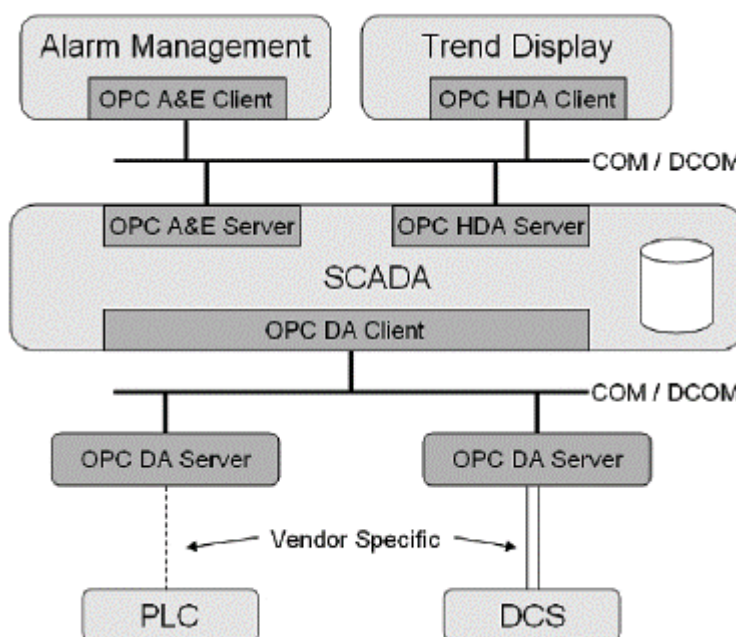
### 5.2.1 Yhteys ohjaavaan automaatiojärjestelmään

Ilman yhteyttä ulkoiseen (simuloituun tai oikeaan) ohjausjärjestelmään ei voida varsinaisesti puhua virtuaalisesta käyttöönotosta vaan kyseessä olisi pelkkä simulointimalli. Virtuaalisen käyttöönoton ideana ja suurimpana hyötynä kuitenkin on se, että lopullista ohjausta päästään testaamaan jo ennen oikean tuotantoyksikön olemassaoloa ja nähdään laitteiston toiminnot suhteessa tähän ohjaukseen. Virtuaalisen käyttöönoton toteuttamiseksi Mechatronics Concept Designer:iin on sisäänrakennettu konfiguroitavissa oleva liityntä ulkoiseen ohjausjärjestelmään. Tämä liityntä hyödyntää joko OPC- tai SHM-tekniikkaan perustuvaa yhteyttä riippuen siitä miten mallia halutaan ohjata, sillä virtuaalisessa käyttöönotossa tarkoitus on mahdollisimman hyvin imitoida todellisen ohjausjärjestelmän signaaliliikennettä. SHM eli *Shared Memory*-tekniikkaa hyödyntävää yhteyttä ei tässä työssä tarkemmin käsitellä, koska kaikki yhteydet luotiin käyttäen OPC-tekniikkaa. SHM-tekniikka tulee oleelliseksi, jos simuloinnissa käytetään myös Siemensin SIMIT-ympäristöä. Tämä on luotu mallintamaan erityyppisiä epälinearisuuksia, kuten esimerkiksi servomootoreiden kiihdytys- ja hidastuskäyriä. Myös SIMIT:n ottamista työhön mukaan harkittiin, mutta sille ei koettu olevan merkittävää tarvetta vielä tässä, luvussa 6 esiteltävässä, projektissa.

OPC kehitettiin tarpeeseen kommunikoida eri valmistajien automaatiojärjestelmien ja erityyppisten datalähteiden välillä, luoden näille yhteisen rajapinnan. Ennen yhteistä rajapintaa ongelmaksi muodostui verkkoliityntöjen sekä käyttöjärjestelmien erilaisuus. Laitteisiin haettiin dataa lähteestä, joka käyttää tälle yhteystyypille spesifistä liityntää ja tallentaa datan laitteeseen puolestaan laitteelle ominaiseen muotoon. Mikäli tälle laitteelle ominainen tiedosto- tai liityntämuoto ei ollut standardisoitu tai yleisesti käytössä, oli tehtävä kustomoitu liityntä näiden laitteiden välille. Tämä saattoi helposti johtaa korkeisiin kustannuksiin automaatio suunnittelussa ja käyttöönotossa, sillä tarvittavien yhteyksien määrä eri laitteiden välillä saattoi tapauskohtaisesti nousta suureksi. Teknologian standardiksi kehitetty OPC hyödyntää Microsoftin kehittämää OLE-tekniikkaa, jossa perustana on mahdollisuus luoda jokin objekti yhdellä sovelluksella ja sisällyttää se sitten toisen sovelluksen sisälle. Nykyisin OLE-tekniikkaan perustuva OPC-tiedonsiirto tunnetaan klassisena OPC-standardina, sillä uudemmat standardit eivät enää hyödynnä OLE-tekniikkaa. [34]

OPC:n toiminnan perustana on kaksi komponenttia: OPC-palvelin ja OPC-asiakas, joista palvelin lukee laitteesta ja kirjoittaa laitteeseen tietoa sekä asiakas pääsee käsiksi palve-

limen dataan. Asiakas-palvelin-rajapinnat on perinteisessä OPC DA (*Data Access*) tiedonsiirrossa toteutettu Microsoftin COM- ja DCOM (*Component Object Model/ Distributed Component Object Model*)-teknologioilla. COM/DCOM-teknologiat ovat tästä syystä Windows-käyttöjärjestelmäriippuvaisia, jolloin OPC DA vaatii alustakseen Windows:n. Tästä huolimatta OPC DA on tärkein ja käytetyin OPC-teknologia 99 % osuudellaan kaikista OPC implementoinneista. [35] Merkittävä syy tähän on OPC DA asiakkaiden reaaliaikaista käyttöoikeutta prosessidataan. Etenkin syklisesti ajettavissa PLC-järjestelmissä etuna on, että OPC-asiakas voi määrittää OPC-palvelimelle päivityssyklin (*Update rate*) haluamilleen prosessisuureille. Tätä sykliä käytetään OPC-palvelimen sykliseen tarkistukseen, jossa havaitut muutokset prosessisuureissa voidaan päivittää asiakkaalle. Erottelukyky (*Percent deadband*) on oleellinen parametri arvoja päivitettäessä, se on prosentuaalinen arvo ylitykselle ja määrittää täten milloin arvot päivitetään. On myös mahdollista päivittää kaikki palvelimen suuret säännöllisin välein, mutta useissa automaatiojärjestelmissä nimikkeiden ja täten lähetettävän datan määrä on tällöin todella suuri. OPC-palvelimen sisältämät tunnisteet on luokiteltavissa eri OPCItem-luokkiin ja nämä puolestaan OPCGroup-ryhmiin. [34]

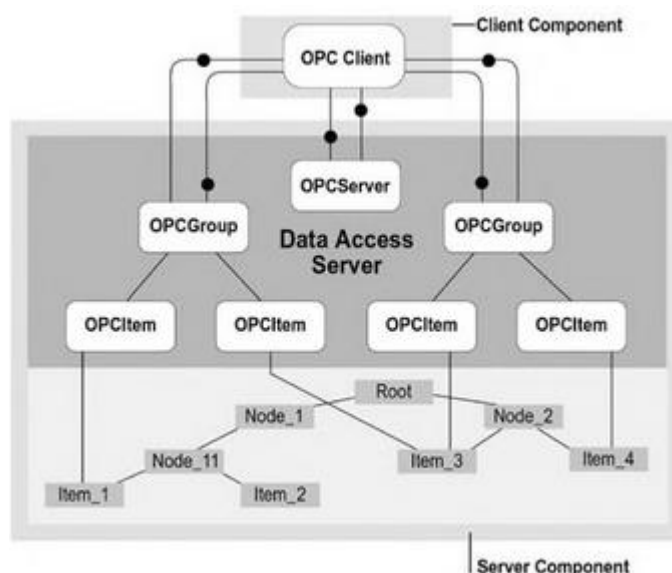


**Kuva 14.** Tyypillinen OPC-palvelimien ja -asiakkaiden käyttötapaus [35]

Kuvassa 14 on esitetty tyypillinen OPC:n käyttötapaus, jossa on havainnollistettu vielä jokaista asiakas-palvelin rajapintaa COM/DCOM merkinnällä. Kuvassa on myös esitetty teollisuuden tarpeisiin kehitettyjä OPC spesifikaatioita, jotka on hyvä mainita. OPC *Alarm & Events* (A&E) määrittää liittynän tapahtumapohjaiseen informaatioon, kuten prosessihälytysten hallintaan. OPC *Historical Data Access* (HDA) puolestaan määrittää tavat päästä käsiksi ja analysoida arkistoitua historiadataa. Kuvan 14 ylimmällä tasolla

on SCADA-järjestelmä (*Supervisory Control And Data Acquisition*), jolla havainnollistetaan OPC:n kommunikointia myös ylemmän tason järjestelmiin eikä vain eri valmistajien PLC- ja DCS-järjestelmien (*Distributed Control System*) välillä. Toisaalta OPC:ta hyödynnetään myös MES- (*Manufacturing Execution System*) ja ERP-järjestelmien (*Enterprise Resource Planning*) tiedonkeruussa. OPC HDA tuottama data on luettavissa eri ohjelmistojen käyttöön, kuten trendi-, raportti- ja analyysiohjelmiin. HDA:n konfigurointi on toimittajakohtaista ja voidaan toteuttaa esimerkiksi Microsoftin SQL-palvelimella. OPC HDA:n käyttöön vaaditaan aina kaksi komponenttia eli OPC HDA-palvelin ja -asiakas. OPC HDA:n käytettyyn datan tallennusformaattiin ei ole erityisiä rajoituksia. [36]

Mechatronics Concept Designer hyödyntää tätä OPC DA liityntää siten, että MCD toimii OPC-asiakkaana ja ottaa yhteyden valittuun ulkoisesti määritettyyn OPC-palvelimeen. Eli MCD:n puolelta voidaan määrittää vain miltä OPC-palvelimelta tunnistetta halutaan lukea ja kirjoittaa sekä haluttu OPC-palvelimen sykli aika. Tämän jälkeen listasta voidaan valita halutut tunnistet, joiden arvot halutaan ladata MCD:n käyttöön. Tarkalleen ottaen MCD tukee viimeisintä versiota OPC DA:sta eli versiota 3.0. Merkittävimpinä päivityksinä versiossa 3.0 on asetettava päivityssykli, joka voidaan asettaa tässä versiossa OPCItem-luokkaan. Tällöin määrätyn OPCGroup-ryhmän luokilla ei tarvitse olla samat päivityssykin arvot. Toinen tärkeä ominaisuus on OPC-asiakkaan ja -palvelimen välisen yhteyden valvonta. Mikäli OPC-palvelinta käytetään vain valvontajärjestelmän yhteydessä I/O-alustana, ei versiossa 3.0 ole pakollista luoda OPCItem ja OPCGroup-olioita. [34] OPC DA-palvelimen komponentit ja näiden OPCGroup ja OPCItem-luokkiin sisältyvät komponentit on esitetty kuvassa 15.



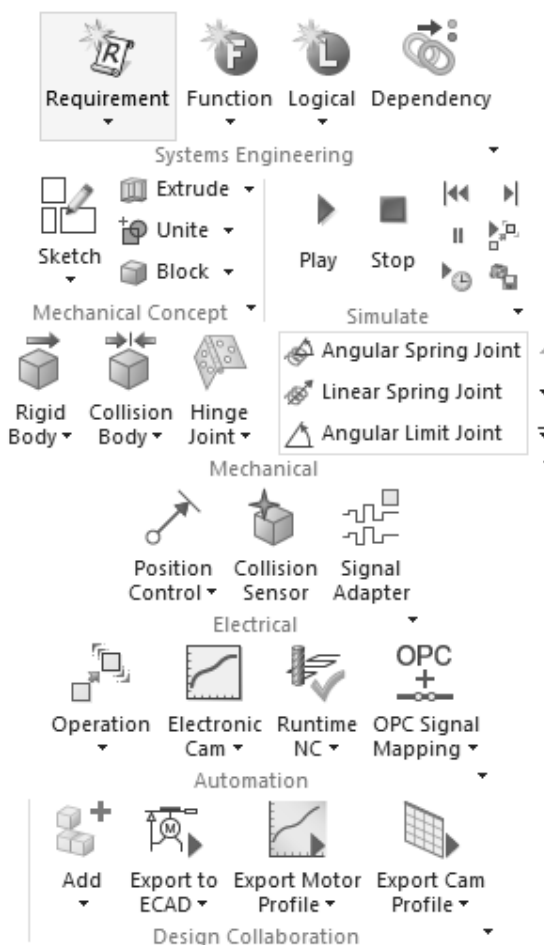
Kuva 15. OPC DA-palvelimen komponentit [34]

OPC:sta on olemassa myös uudempi standardi OPC UA (*Unified Architecture*), joka kehitettiin pääasiassa korjaamaan COM-rajapinnan aiheuttama Windows-riippuvuus. Ennen OPC UA:n kehittämistä tehtiin myös XML-pohjainen OPC XML-DA, jolla pyrittiin eliminoimaan sama ongelma. XML Web Service ei kuitenkaan pystynyt samaan suorituskyykyyn, johon alkuperäinen OPC DA COM-rajapinnalla pääsi. Myös yhteensopivuus ja toimivuus eri järjestelmien välillä kärsivät, mistä syystä se ei ollut varteenotettava vaihtoehto OPC DA:lle. OPC UA:n kehityksessä tavoiteltiin vähintäänkin yhtä hyvää toiminnallisuutta ja suorituskyykyä kuin mihin COM-rajapinnalla pystyttiin.

## 5.2.2 Simulointityökalut ja toiminnallisuudet

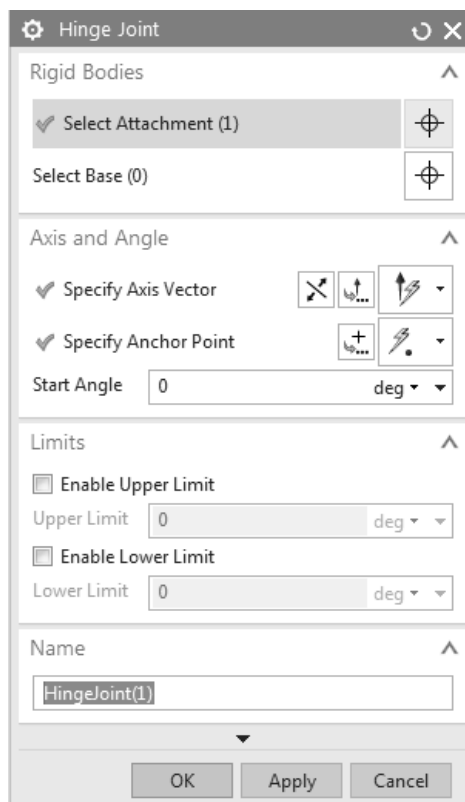
Mechatronics Concept Designer -laajennusosan työkalut on jaettu useaan eri osakokonaisuuteen ja niiden käyttö vastaa tyypillistä 3D-mallinnusohjelman käyttötapaa. Yläpalkin Home-valikon alta löytyy kaikki eri kategorioiden MCD-työkalut. Ne on jaettu seuraavasti:

- **Systems Engineering;** Sisältää järjestelmäsuunnittelun työkaluja vaatimusten määrittelyyn sekä toiminnallisen ja loogisen mallin suunnitteluun.
- **Mechanical Concept;** Sisältää työkalut uusien geometrioiden luontiin sekä olemassa olevien muokkaukseen. Mikäli Siemensin NX peruslisenssi on käytettävissä, voi mallinnusta tehdä kattavammin NX:n mallinnuspuolella.
- **Simulate;** Sisältää simuloinnin toistamiseen käytettävät toiminnot, kuten aikaskaalauksen, jolla määritetään simuloinnin esitysnopeus.
- **Mechanical;** Sisältää malliin lisättävät fysikaaliset ominaisuudet. Kappaleille määritettävät kiinteän kappaleen sekä törmäysominaisuudet määritetään täältä. Lisäksi tämä kategoria sisältää eri kappaleiden välille määritettävät nivelliitokset sekä esimerkiksi kuljetinpintojen määrittämiseen käyttävän työkalun sekä jousivoimaa tuottavien rajoitteiden työkalut. Kaiken kaikkiaan tämä kategoria on laajin MCD:n toiminnallisuuksien määrittämiseen käytetty kategoria.
- **Electrical;** Sisältää edellisessä kategoriassa määritettyihin niveliin kytkettävän paikka- tai nopeusohjauksen työkalut sekä antureiden määrittämiseen käytetyn *Collision Sensor* -työkalun. Näiden lisäksi myös ohjaukseen käytettävät signaalit luodaan tästä kategoriasta löytyvällä *Signal Adapter* -työkalulla.
- **Automation;** Sisältää simulaation kinematiikan kontrollointiin käytettävät työkalut. *Operation*-työkalulla luodaan aiemmin mainittuun *Sequence Editoriin* käytettävät operaatiot. Myös MCD:n ja ulkoisen automaatiojärjestelmän signaalien toisiinsa yhdistämiseen käytettävät työkalut kuuluvat tähän kategoriaan.
- **Design Collaboration;** Sisältää muiden suunnitteluohjelmien väliseen kommunikointiin ja yhteistyöhön tarkoitettut työkalut. Uusia osia voi tuoda lisäämällä ne tätä kautta, lisäksi osia voi myös korvata toisilla. Tietojen vienti ja tuonti muiden ohjelmien suunnitteluohjelmien välillä on tehtävissä tätä kautta.



**Kuva 16.** *Mechatronics Concept Designer-lisäosan yläpalkin työkaluja*

Liitteessä A on esitetty suuntaa antava ohjeistus MCD projektin työnkulusta. Poistamalla yllä olevasta työkalukategorialistasta Simulate-kategoria, vastaa listan järjestys melko tarkasti ohjeistettua työnkulkua. Kuvassa 16 on havainnollistettu edellä mainitun kategorijaon näkymää Mechatronics Concept Designer:n käyttöliittymässä. Jotta 3D-mallin yksittäinen kappale huomioidaan simulaatiossa, on sille määritettävä vähintään kiinteän kappaleen (*Rigid body*) vaatimat piirteet. Tämän jälkeen määritetään mahdollinen törmäyspinta (*Collision body*) sekä liitos/liitokset (*Joint*) toisiin kappaleisiin. Ilman liitosta kappale putoaa putoamiskiihtyvyyden määrittämään suuntaan. Simulointimallin rakentamista aloittaessa kannattaa testata putoamiskiihtyvyyden suunta oikeaksi, jolloin välttyy ennalta-arvaamattomalta toiminnalta myöhemmissä vaiheissa.



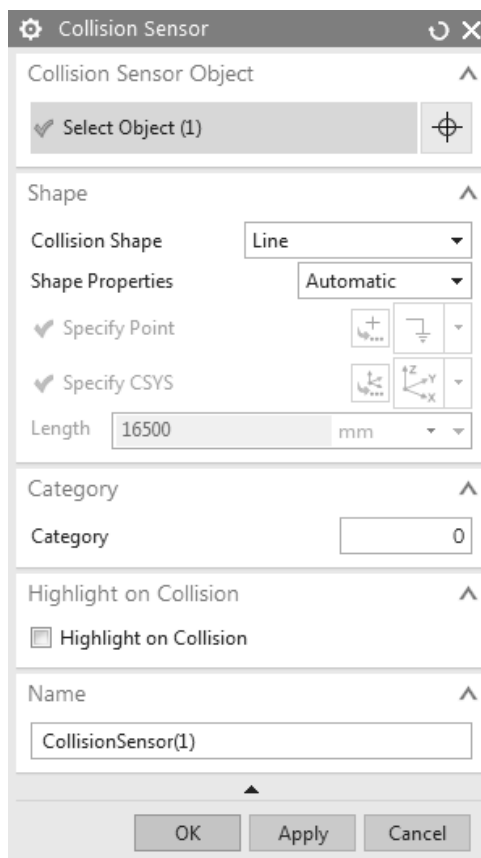
**Kuva 17.** Saranaliitoksen määrittäminen Mechatronics Concept Designer:ssä

Paikallaan pysyville tukirakenteille, joihin muita osia on tarkoitus kiinnittää, määritetään kiinteä liitos (*Fixed joint*). Muita liitoksia ovat: sarana (*Hinge*), liukupinta (*Sliding*), sylinteri (*Cylindrical*), virtuaaliakseli (*Virtual axis*), pallo (*Ball*), piste käyrällä (*Point on curve*), käyrä käyrällä (*Curve on curve*) ja määritetty rata (*Path constraint*). Lisäksi sarana- ja lineaarisen liikkeen liitosten erikoistapauksia voi määrittää erikseen liitoksilla, joissa on vastustava jousivoima (*Spring*) tai tietty raja-arvo (*Limit*). Nämä ovat Mechanical-kategoriasta tärkeimmät työkalut, joista melkein kaikkia tarvitsee useimmissa simulointitoteutuksissa. Kuvassa 17 on esitetty saranaliitoksen määrittäminen, jossa määritetään saranan liikkuva osa (*Attachment*), pyörintäakseli (*Axis vector*) sekä kiinnityspiste, jossa pyörintäakseli sijaitsee (*Anchor point*). Lisäksi joissakin tapauksissa on määritettävä myös paikallaan pysyvä runko (*Base*). Tämä tulee kysymykseen ainakin, mikäli liitoksia on useampi peräjälkeen ja halutaan varmistaa, että liitos pyörii vain suhteessa edelliseen.

Mikäli jollakin piirteellä tai osalla ei ole simuloinnin kannalta merkitystä, kannattaa se jättää määrittämättä kiinteäksi kappaleeksi ja törmäyspinnaksi, jolloin simulointi säilyy mahdollisimman yksinkertaisena ilman ylimääräistä laskentaa. Myös malliin kesken simuloinnin luotavien kappaleiden määrä vaikuttaa laskentaan merkittävästi. Yläpalkin Mechanical-kategorian Rigid body-tekstistä painettaessa esiin saadaan alavalikko, josta voidaan määrittää objektilähde (*Object source*). Objektilähteellä voidaan luoda uusia en-

nalta määritetyn geometrian omaavia objekteja joko määritetyllä aikavälillä tai ohjaussignaalin avulla. Pienennettäessä aikaväliä todella pieneksi on huomattavissa simuloinnin hidastumista ja viiveen kertymistä. Tämä johtuu myös liian raskaasta laskennasta ja simulointimallista, sillä Object sourcen avulla luotujen objektien on yleensä oltava törmäyskappaleita. Tällöin MCD laskee jokaiselle tällaiselle objektille törmäystilanteen joka hetki (simuloinnille ennalta määritetty aika-askel), jolloin suurempi määrä näitä objekteja luo simulointimallista entistä raskaamman. Tätä voidaan minimoida luomalla objektin liikealueen loppuun objektinielu (*Object sink*), joka hävittää objektit simulointimallista. Objektinielulle voidaan määrittää objektikohtaisuus, jolloin se poistaa mallista vain yksittäisellä lähteellä luodut objektit. Object sink määritetään valitun geometrian mukaan ja tyypillisiä käyttötapoja on esimerkiksi tilan lattia tai lopullisen pakkauksen pohja. Objektinielua käyttämällä ylimääräiset simulointia hidastavat kappaleet voidaan poistaa näkyvistä ja täten myös vaikuttamasta laskentaan.

Electrical-kategoria sisältää siis antureiden määrittämiseen tarkoitetun Collision sensor-työkalun, joka mahdollistaa laatikon, viivan ja pallon mallisen törmäysmuodon määrittämisen. Näiden rajoitteiden mukaan voi joko mallintaa anturivalmistajan antamien tietojen mukaisen tunnistusalueen, tai anturin voi halutessaan liittää jo mallinnettuun geometriaan. Kuvassa 18 on havainnollistettu anturin tunnistusalueen eli törmäysmuodon määrittäminen kohdassa *Collision Shape*. Mikäli anturin tunnistusalueeksi valitsee aiemmin mallinnetun kappaleen, voi *Shape Properties* -valikosta valita halutessaan käyttäjän määrittämän muodon. Tällöin tunnistusalueen muotoa voi muokata vapaasti muokkaamatta kuitenkaan siihen linkitettyä kappaletta. Sama pätee myös aiemmin esitettyyn *Collision body*:n määrittämiseen. Näin tehtäessä on muistettava siirtää tarvittaessa sekä törmäysmuotoa, että itse kappaletta. Simuloinnilla saa aikaiseksi mielenkiintoisia tuloksia, mikäli törmäysmuoto jää alkuperäiselle paikalleen kappaletta siirrettäessä. Määrittämällä kiinnityspisteen riippuvaiseksi linkitetystä kappaleesta saattaa törmäysmuoto liikkua mukana, mutta poikkeuksiakin havaittiin.



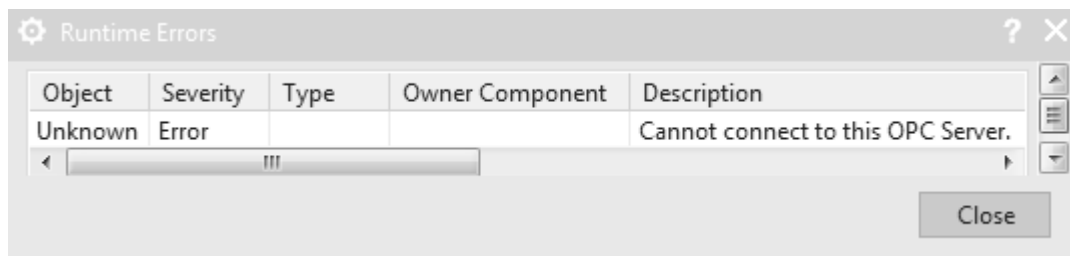
**Kuva 18.** Antureiden määrittämiseen käytettävä Collision sensor-työkalu

Hyvä tapa on luoda Mechanical concept-kategorian työkaluilla uusi geometria, jota törmäysmuoto vastaa täysin ja pitää Shape properties -valinta automaattivalinnalla. Sama pätee toki myös ennalta luotuihin kappaleisiin, joissa vain anturin tunnistusalue voi vastata koko osan geometriaa.

Määritetyt anturit voidaan liittää ohjaamaan Electrical-kategorian *Position Control*, *Speed Control* sekä *Transport Surface* työkaluja. Tämä tapahtuu joko ulkoisen automaatiojärjestelmän, MCD:n Sequence editorin tai MCD:n käyttöliittymästä käsin simuloitavien signaaliarvojen avulla. Mikäli ohjaus toteutetaan ulkopuolisella automaatiojärjestelmällä, kuten virtuaalisen käyttöönoton konseptista on tarkoitus, määritetään Signal adapter-työkalun avulla ohjaavat sisääntulo- ja ulosmenosignaalit. Toisaalta, vaikka tarkoituksena olisi käyttää vain MCD:n sisäistä ohjausta eli Sequence Editoria voi signaalit määrittää ja hyödyntää niitä Sequence Editorin ehtoina. Tällöin anturi vain aktivoi signaalin, jota MCD käyttää ohjauksessaan. Toinen vaihtoehto on liittää Sequence Editorin tapahtumien (*Operation*) ehdoiksi suoraan aktivoituneen anturin törmäysmuodon tieto. Mikäli signaalit määritellään Signal Adapterin avulla, voidaan niiden arvoa muuttaa kesken simuloinnin siirtämällä ne ennen simuloinnin käynnistystä *Runtime Inspector*-työkaluun. Tämän jälkeen signaalien *Boolean*-arvoja voidaan muuttaa tuplaklikkaamalla. Runtime Inspector löytyy käyttöliittymän vasemmasta sivupalkista.



Automation-kategoriassa tärkeimpänä työkaluna on *OPC Signal Mapping* (tai vaihtoehtoisesti *SHM Signal Mapping*), jolla ulkoisen automaatiojärjestelmän signaalit yhdistetään MCD:n simuloituihin signaaleihin. Signal Adapterissa sisääntulona MCD:hen tulevan signaalin ohjaukselle voidaan vielä asettaa ehtoja, mikäli ulkoisen ohjausjärjestelmän ulostuloa halutaan vielä muokata. Usein ulkoisen ohjausjärjestelmän signaali tarvitsee vielä linkittää ohjaamaan simuloitua toimilaitetta. Signal mapping -valikossa ulkoisen ohjausjärjestelmän signaalit yhdistetään haluttuihin simulaatiomallin signaaleihin valitsemalla listasta valitulta OPC-palvelimelta löytyvät tunnisteet sekä eri Signal adaptereista löytyvät signaalit. OPC-palvelin valitaan Automation-kategorian valikosta painamalla OPC Signal mapping tekstiä, jolloin saadaan näkyviin *OPC Client parameters*. Avautuvasta valikosta valitaan sekä haluttu OPC-palvelin, että simuloinnin OPC-signaalien päivitysaika. Päivitysaika on valittava siten, että simulointimalli saa päivitetyt arvot jokaisella kierroksella. Mikäli näin ei käy ilmestyy kuvaa 19 vastaava virheilmoitus.



**Kuva 19.** *OPC-kommunikaation liian lyhyestä päivitysajasta ilmestyy virheilmoitus*

Kuvassa 19 esitetty ilmoitus voi johtua myös yhteyskatkoksesta OPC-asiakkaan, eli MCD:n, ja palvelimen välillä. Mikäli yhteys kuitenkin toimii ja kyseinen virheilmoitus ilmestyy satunnaisesti, johtuu se todennäköisesti päivitysajasta. OPC-asiakkaan päivitysaikaa voi pienentää oletuksesta, mutta ilmeisesti MCD havaitsee, mikäli OPC-palvelimen arvot eivät ole päivittyneet. Tästä syystä MCD:n OPC päivitysaika ja ulkoisen ohjausjärjestelmän PLC:n sykli aika on oltava asetettu siten, että PLC päivittää arvoja OPC-palvelimelle useammin kuin MCD niitä yrittää lukea.

## 6. PROJEKTIN TOTEUTUS - CASE MCD

Tässä luvussa perehdytään yhdessä Etteplan Oyj:n, Ideal Product Data Oy:n ja asiakasyrityksen kanssa yhteistyössä toteutettuun tutkimukseen virtuaalisen käyttöönoton toivuudesta ja hyödyistä automaatiolinjan suunnitteluprojektin yhteydessä. Projektiin päädyttiin siten, että Ideal Product Data Oy oli kiinnostunut tekemään yhteistyötä Etteplan Oyj kanssa tarjoten ohjelmistoaan konseptisuunnittelun simulointiin liittyen. Asiakasyritys puolestaan oli jo ennen projektin alkua Etteplan Oyj:n asiakas ja esisuunnitteluvaihe tähän kyseiseen projektiin oli jo toteutettu. Kyseinen projekti oli siis siinä vaiheessa, että siihen oli hyvä liittää simulointi osaksi suunnittelua ja myös asiakas oli kiinnostunut näkemään simuloinnin tuloksia. Luvun 5 mukaisesti projektissa käytettiin Siemensin NX-mallinnusympäristöä sekä siihen kuuluvaa lisäosaa Mechatronics Concept Designia.

### 6.1 Etteplan Oyj ja virtuaalinen käyttöönotto

Etteplan Oyj halusi toteuttaa tämän tutkimuksen virtuaalisesta käyttöönotosta kehittääkseen suunnittelutoimintaansa. Tavoitteena oli ottaa virtuaalinen käyttöönotto osaksi automaatiosuunnittelun toimintaa ja lisätä sen avulla mekaniikka- ja automaatiosuunnittelun yhteistyötä. Virtuaalinen käyttöönotto oli tarkoitus ottaa HIL-simuloinnin käytäntöjen mukaisesti mahdollisimman aikaisessa vaiheessa suunnitteluprosessiin mukaan ja jatkaa suunnitteluprosessin mukana aina hybridi- sekä todelliseen käyttöönottoon asti. Käyttöönoton jälkeen myös virtuaaliseen käyttöönottoon tuotettujen mallien hyödyntäminen markkinointi, käyttäjäkoulutus ja myyntikäyttöön oli myös osaintressinä. HIL-simuloinnin hyödyistä tärkeimpinä Etteplanilla oli mielessä säästöt suunnittelussa aiheutuneissa kuluissa ja kehitykseen käytetyssä ajassa, äärimmäisten ja turvakriittisten tilanteiden sekä erilaisten vikatilanteiden testaus ja operointi aiheuttamatta vahinkoa laitteistolle tai ihmisille, todellisen signaaliliitynnän testaus prosessin ja ohjaavan laitteiston välillä sekä ohjauslaitteiston ja -ohjelmiston suunnittelu ja testaus ilman liityntää todelliseen prosessiin.

Etteplanin suunnittelukäytännöt vastasivat hyvin pitkälle rinnakkaissuunnittelun periaatetta, mutta mekaniikka- ja automaatiosuunnittelun yhteistyön kehittäminen voisi vähentää vasta käyttöönottovaiheessa havaittujen vikojen määrää. Nopeampi suunnitteluvirheidenvähäisy sekä lyhempi markkinoille tuloaika olivat suurimmat tavoitteet projektia aloitettaessa. Tämän lisäksi myös energian käytön pienentäminen sekä käytetyn materiaalin vähentäminen ylimääräisten prototyyppien tekemättä jättämisellä oli osa virtuaalisella käyttöönotolla tavoiteltuja hyötyjä.

Liitteessä B on esitetty ote Etteplan Oyj:n suunnitteluohjeistuksesta, jossa on mainittu useita edellä mainittuja suunnitteluprojektin aikana huomioitavia ja painotettavia asioita. Virtuaalisella käyttöönotolla pyritään vaikuttamaan näihin asioihin ja luomaan projektin

kulusta sujuvampaa. Virtuaalinen käyttöönotto ja suunnittelun alkuvaiheiden DMU:t voisivat olla osana asiakkaille tapahtuvaa raportointia, luoden näin selkeämmän kuvan projektin toteutuksesta kaikille osapuolille. Lisäapua suunnittelijan kannalta virtuaalinen käyttöönotto voi tuoda ainakin suorituskyvyn, turvallisuuden ja toimintavarmuuden testaamiseen. Virtuaalisen käyttöönoton avulla asiakkaalle saadaan selkeämpiä tuloksia suorituskyvystä sekä toimintavarmuudesta jo hyvissä ajoin ennen todellisen laitteiston käyttöönottoa.

## 6.2 Projektin esittely

Projektin taustalla oli vanhan lajittelulinjaston uudistaminen ja manuaalisen työkuorman vähentäminen. Nykyisellä lajitteluratkaisulla neljän eri lajitteluvaiheen välissä tuotteet viedään manuaalisesti uuteen lajitteluvaiheeseen ja lopulta lajitellut erät kuljetetaan pakkauspiesteelle. Uuden ratkaisun suurimpana haasteena oli 100 % varmuus viivakoodin lukemisen ja automaattisen lajittelun yhdistämisessä. Vanhassa toteutuksessa viivakoodit luetaan käsin juuri ennen tuotteiden lopullista pakkausta, jolloin kunkin laatikon sisältämät tuotteet kirjataan järjestelmään. Nyt uudessa toteutuksessa viivakoodi luetaan linjaston alussa, jonka jälkeen tuote pudotetaan kuljetinlinjastolle ja kuvataan konenäköjärjestelmällä ja tuotteen tarkemmat tiedot tallennetaan.

Tämän jälkeen tuote putoaa toiselle kuljetuslinjalle, sille alussa määrätyn luukun päälle, josta tuote pudotetaan lopulliseen pakkaukseensa. Viimeisen vaiheen pudotuksessa vaihtoehtoja on 24, eli tuotekategorioita voi maksimissaan olla kerrallaan tämä määrä. Viivakoodin sisältämä tieto välittyy kahden eri kuljetinratkaisun välillä ja ennen tuotteen pudotusta toiselle linjalle liitetään konenäköjärjestelmän tallentama tieto tuotteen viivakoodiin. Tällöin lopulliseen pakkaukseen pudotettaessa voidaan tuotteet lajitella tarkasti pituuden ja värisävyn tai muun konenäköjärjestelmällä mitatun suureen mukaan omiin laatikkoihinsa. Lisäksi lajitteluun vaikuttaa tuotteen toimittajan sertifiointiluokitus. Lajittelulinjaston kapasiteetin määritti konenäköjärjestelmän asettamat rajoitukset, eli konenäköjärjestelmä kuvaa jokaisen tuotteen ja tallettaa niistä mitatut suuret tietokantaan, joka voidaan tehdä luotettavasti linjanopeudella 1.8 m/s. Tämä konenäköjärjestelmä on kolmannen osapuolen toimittama järjestelmä, joita on jo asiakkaalla olemassa. Toimitusvalmiin pakkauksen sulkemiseen, tiivistämiseen ja sitomiseen käytetään järjestelmään liitettävää jo olemassa olevaa paketointi linjastoa.

Virtuaalisen käyttöönoton osalta projekti lähti liikkeelle luvun 6 alussa mainitusta kiinnostuksesta yhteistyöhön ja mahdollisiin saavutettaviin hyötyihin. Asiakasyritys oli kiinnostunut näkemään takeita esisuunnittelun tuottamien konseptien suorituskyvystä ja oli kiinnostunut simuloimaan lajitteluprosessiaan ennen lopullista investointipäätöstä. Projektin kriittisin paikka on 90 asteen suunnan muutos kameralinjan kuljettimelta lajittelukuljettimelle. Lajittelukuljettimella on 40 senttimetriä leveitä luokkuja, joiden avulla tuotteet pudotetaan oikeisiin laatikkoihin niiden alla. Tämän linjan nopeudeksi määritettiin 1 m/s, jolloin pudotukseen on aikaa alle 0,4 s. Koska tuotteiden leveys vaihtelee jotakuinkin

välillä 10 – 15 senttimetriä, on pudotuksen ajoitus todellisuudessa hieman vielä tätäkin tarkempaa.

### 6.3 Virtuaalisen käyttöönoton työnkulku

Aluksi on tärkeää määrittää mitä virtuaalisella käyttöönotolla halutaan saavuttaa. Onko simulaatiomallia tarkoitus hyödyntää myös laajemmassa mittakaavassa vai vain edesauttamaan käyttöönottovaiheessa? Ongelmakiesi muodostuu ylimääräisen työn aiheuttamat kustannukset. On olemassa projekteja, jotka ovat lähes suoria kopioita joistakin aiemmista ja tällöin virheiden määrä putoaa oletettavasti jo muutenkin suhteessa ensimmäiseen toteutukseen, eikä virtuaalisen käyttöönoton hyödyt ole välttämättä niin merkittävät. On kuitenkin eri asia, mikäli simulaatiomallia halutaan pystyä hyödyntämään esimerkiksi vianhakuun tai käyttäjäkoulutukseen myöhemmässä vaiheessa. Kuten (luvussa 6.1) aiemmin on mainittu, oli Etteplanin tarkoitus ottaa virtuaalinen käyttöönotto mahdollisimman monipuolisesti mukaan jo aivan suunnittelun alkuvaiheista asti aina käyttöhenkilökunnan koulutukseen asti. Tämä projekti kuitenkin oli jo siinä vaiheessa, että yksi toteutusidea oli hylätty asiakkaan toimesta ja toisesta oli suunniteltu kolme konseptia, joista asiakas valitsisi mielestään parhaan. Täten simulointi toteutettaisiin aluksi konseptivaiheen suunnittelun varmistamiseksi sekä suunniteltujen konseptien toiminnallisuuksien havainnollistamiseen asiakkaalle.

Virtuaalisessa käyttöönotossa keskityttiin aiemmin mainittuun epävarmuuskohtaan kuljetinlinjojen välisessä suunnanmuutoksessa ja tuotteen siirrossa linjalta toiselle. Edellä mainitut kolme konseptia olivat vaihtoehtoisia ratkaisuita juuri tähän. Tämän lisäksi tarkasteltiin kahta eri vaihtoehtoa viivakoodinlukupisteeltä kameralinjalta tapahtuvalle pudotukselle. Virtuaalisen käyttöönoton avulla oli tarkoitus simuloida automatisoidun linjan toimintaa. Toteuttaa ns. tehdassimulaatio (*Factory simulation*), johon ei tässä tapauksessa otettaisi mukaan mitään varsinaisia törmäystestejä, joissa jonkin laitteen kestävyyttä testattaisiin. Virtuaalisen käyttöönoton tarkoitus oli vain ja ainoastaan varmistua laitteiston oikeanlaisesta toiminnasta ja löytää mahdolliset ongelmat sekä testata, samalla kehittäen, lopullinen ohjaus kyseiselle laitteistolle.

Tähän projektiin virtuaalinen käyttöönotto tuli mukaan esisuunnittelun jälkeisessä vaiheessa, kun konseptit oli jo esitelty asiakkaalle. Täten virtuaalisessa käyttöönotossa mahdollisesti havaitut ongelmat korjattaisiin ennen fyysisen linjaston rakentamista ja lopullista käyttöönottoa. Ajoitus oli siinä mielessä hyvä, että 3D-mallit olivat jo valmiina, eikä niitä päivitetty jatkuvasti ja uuden käytännön sekä ohjelman testaaminen onnistui ilman lisätyötä muille projektiin osallistuneille. Toisaalta ajoitus ei vastannut täysin suunniteltua, sillä virtuaalinen käyttöönotto ja digitaalinen malli olisi tarkoitus ottaa mukaan hieman aiemmin. Mikäli virtuaalinen käyttöönotto olisi päästy aloittamaan aiemmin integroituna mekaniikkasuunnittelun kanssa, olisi virtuaalisesta käyttöönotosta vastaava henkilö ollut projektin alusta asti tiedotuksessa mukana. Nyt ensimmäisenä tämän hetkisen

suunnitelman toimintaa käytiin läpi yhdessä mekaniikkasuunnittelun kanssa, jotta tiedettiin mitä tulevalla linjastolla tuli saavuttaa ja mitä toiminnallisuuksia täytyi varmistaa. Tämän jälkeen linjaston toimintaa mallinnettiin ensin Sequence Editorilla, testaamalla lajittelukonseptien toimintaa. Heti kun projektiin suunniteltua vastaava PLC oli käytettävissä, pyrittiin se ottamaan simulointiin mukaan. Käytössä olleen tietokoneen laskentateho osoittautui rajalliseksi ja tästä syystä PLC:n ollessa mukana simuloinnissa ajettiin simulointia kymmenesosanopeudella normaalinopeudesta. Kun PLC liitettiin mukaan, muutettiin ohjaustoteutus sellaiseksi, että pudotettaessa tuote kameralinjalle, on se jo ajoitettu sille määrättyyn lokeroon lajittelukuljettimella. Tässä vaiheessa huomattiin, että tuotteet eivät missään vaiheessa tule menemään vierekkäin kameralinjalla, ellei viiveitä lajittelulinjalle pudotettaessa kasvateta huomattavasti. Kameran pitäisi pystyä suoriutumaan kuvattavista tuotteista myös tapauksessa, jossa tuotteet eivät tule rinnakkain kameralle. Ylimääräisiä viiveitä ei pudotusvaiheeseen täten suunniteltu. Testattaessa eri konseptien toimintaa havaittiin, että ajoitukseen käytettyjen anturien paikat muuttuvat merkittävästi toteutuksesta riippuen. Kun perustoiminta oli saatu kuntoon, lähdettiin ajoitusta tarkentamaan ja testaamaan eri toimintanopeuksia sekä linjastolle, että toimilaitteille. Tällä tavoin saatiin tutkittua raja-arvoja esimerkiksi linjaston alkupään tuotteen sijoittelulle. Kameralinjalle pudotettaessa on tuotteen etureuna oltava noin 30 cm alueen sisällä, jotta tuote putoaa oikean luukun päälle. Tuotteen vaihteleva pituus ei vaikuta lopputulokseen ja painonvaihtelu on pientä, joten senkään ei koettu muuttavan toimintaa. Näiden testien jälkeen simulointia esiteltiin asiakkaalle, toteutettiin konseptien esittelyvaiheessa jo pienimuotoinen virtuaalinen FAT, jossa asiakas pääsi näkemään linjaston toimintaa sekä vertaamaan sitä vaatimuksiinsa.

## 6.4 Mitä saavutettiin?

Virtuaalinen käyttöönotto tuotti virtuaalisen mallin mahdollisesti tulevaisuudessa käyttöönotettavasta lajittelulinjasta. Virtuaalisen mallin avulla päästiin esittelemään asiakkaalle konseptien toimintaa helposti ja ilman suuria investointeja. Ennen mitään päätöstä siitä, millä konseptilla linjan toteutusta jatketaan, saatiin virtuaalista FAT:a vastaava alustava esittely asiakkaan kanssa tehtyä ja palautetta näistä ratkaisuista. Asiakas koki, että aiempiin kokemuksiinsa ja toteutettuihin linjoihin verrattaessa virtuaalinen malli käyttäytyy hyvin vastaavalla tavalla ja tämän perusteella asiakas on luottavainen saavutettuihin tuloksiin. Valitettavasti asiakkaan hankinta- ja toteutuspäätös siirtyvät myöhemmäksi ja täysin vertailtavissa olevia tuloksia ei ole ainakaan vielä saatavilla.

### 6.4.1 Havainnot ja tulokset

Virtuaalinen käyttöönotto on toimivin sellaisissa projekteissa, joissa suunnitellaan uudentyyppisiä tuotteita/linjoja. Mitä enemmän epävarmuustekijöitä on, sitä suuremmalla syyllä virtuaalinen käyttöönotto on vartenotettava vaihtoehto ja sitä suuremman hyödyn konseptien aikaisemmasta testaamisesta voi saada. Mikäli havaitaan epävarmuustekijöitä

olevan liikaa, voidaan kyseinen konsepti joko siirtää sivuun tai testata virtuaalisesti kriittisimmiltä osin. Tämä testaus voi tuottaa lisätietoa konseptin toimivuudesta ja luoda uusia ideoita konseptin muokkaamiseen. Toisaalta ajatellen pelkkää käyttöönottoa, saavutetaan virtuaalisen käyttöönoton avulla selkeitä etuja, jos projekti on todella laaja ja virhelähteitä on paljon. Tällöin kaikki ennen lopullisissa tuotantotiloissa suoritettavaa käyttöönottoa eliminoidut virhelähteet vähentävät todellista käyttöönottoon käytettyä aikaa. Kuten luvussa 3.1 mainittiin, tyypillisesti käyttöönoton aikana havaittavat ohjausjärjestelmän toimintaan liittyvät virheet aiheuttavat keskimäärin 9,5 – 13 % ajallisia tappioita projektiin käytetystä kokonaisajasta [9]. Taloudellisia säästöjä voidaan saavuttaa sitä enemmän, mitä enemmän ylimääräisiä kuluja suunnittelevalle taholle perinteisestä käyttöönotosta syntyy. Tästä hyvä esimerkki on kuvan 11 havainnollistama prototyyppien määrän vähentämisen tuottama kustannussäästö. Toisaalta on hyvin vaikea arvioida, missä vaiheessa projekti on jo liian monimutkainen ja virtuaalisen käyttöönoton mallin tuottaminen aiheuttaa jo liikaa lisäkustannuksia. Tällöin on huomioitava käyttöönoton kannalta kriittisimmät kohdat ja keskityttävä niihin. Lisäksi etäisyys käyttöönottokohteeseen voi jo itsessään aiheuttaa suuria menoeriä ja lyhentämällä läsnäoloa loppukohteessa voidaan suunnittelevan tahon kustannuksia säästää. Tällöin entistä kriittisemmäksi muodostuu fyysisen läsnäolon ajoittaminen oikeaan ajankohtaan. Siirryttäessä käyttöönottokohteeseen on laitteiston oltava siinä kunnossa, että testejä pystytään tekemään.

Huomattavin hyöty tässä projektissa saatiin siirryttäessä ohjaamaan virtuaalista mallia todellisuudessakin käytettävällä Siemens S7-1500 PLC:lla. Tuotetun ohjelmakoodin testaaminen pienissä osissa osoittautui toimivaksi tavaksi edetä ohjauksen toteutuksessa. Suora palaute siitä, että toimiiko ohjaus niin kuin sen oli ajatellut toimivan, johti siihen, että virhetilanteisiin pääsi heti puuttumaan ja useimmiten ymmärsi mistä kyseinen virheellinen toiminta johtui. Suurta kokonaisuutta käyttöönotettaessa pieniä virheitä on vaikea havaita ja todellisen virheen tunnistaminen on haastavaa. Tässä projektissa tuli eteen tilanne, jossa erilaisia poikkeustapauksia olisi tarvinnut ottaa huomioon paljon ja niistä johtuen yhden tuotteen tilalla olisi ollut lopulta useampi tuote päällekkäin, johtaen lajitteluvirheisiin. Tästä ongelmasta päästiin eroon lisäämällä kaksi anturia toteutukseen ja muuttamalla lajittelua siten, että eri lajittelupöydiltä tuotteet pudotetaan jo lähtökohtaisesti eri luukkujen päälle. Esimerkiksi kameranlinjan vasenta puolta kulkevat tuotteet putoavat lopulta luukuille 1, 3, 5, jne., kun taas oikeaa puolta kulkevat putoavat tuotteet putoavat luukuille 2, 4, 6, jne.. Tällöin tuotteen ollessa myöhässä ensimmäisen vaiheen lajittelusta vaikuttaa se vain tämän puolen tuotteisiin ja väliin ei jää parhaimmassa tapauksessa yhtään luukku. Mikäli ohjaus olisi tehty alun suunnitelman mukaan, olisi jokainen viivästyminen täytynyt tarkastella erikseen ja varmistua siitä, että jokaiselle luukulle pudotetaan aina vain yksi tuote, eikä huonoimmassa tapauksessa neljää. Jos tämä korjaus olisi jäänyt vasta lopulliseen käyttöönottoon, olisi mahdollisia poikkeustapauksia todennäköisesti korjattu yksi kerrallaan niiden tullessa eteen, eikä anturointia mahdollisesti olisi enää voinut muuttaa.

Toinen hyödyllinen piirre oli simuloinnin mahdollistama hidastus, joka mahdollisti ohjauksen tarkemman ajastamisen. Kyseisessä järjestelmässä uusia tuotteita putoaa lajitte-lukuljettimen luukuille täydellä kapasiteetilla noin 0,5 – 0,6 sekunnin välein. Tällöin yksittäisen tuotteen seuraaminen ja tarkka paikoittaminen on haastavaa. Simulointia voidaan kuitenkin hidastaa kymmenesosanopeuteen todellisesta, jolloin yksittäisen tuotteen tarkkaa putoamiskohtaa on helpompi tarkastella ja syytä mahdolliselle ongelmalle on helpompi etsiä. Myös tässä pätee sama fakta siitä, että mikäli ajoituksen säätäminen olisi jäänyt lopulliseen käyttöönottoon, olisi se ollut haastavampaa ja vienyt ainakin aikaa. On myös tärkeätä muistaa, että simuloinnilla pystyttiin ajastamaan kolme eri toteutusvaihtoehtoa kohdalleen lyhyessä ajassa, simuloinnin mahdollistaessa pysäytyksen kesken toiminnan ja pysäytetyn mallin kappaleiden välisten etäisyyksien mittaamisen. Myös eri nopeusvaihtoehtojen testaaminen onnistui. Tämä voi osoittautua lopullisessa käyttöönotossa myös tärkeäksi piirteeksi, mikäli esimerkiksi kamerayksikkö ei suoriudu vaatimusten mukaisesti 1,8 m/s nopeudesta. Tällöin pystytään testaamaan virtuaalisella mallilla tarkka viive pudotussignaalista ja anturin sijaintia ei tarvitse muuttaa. Toisaalta, jos tulevaisuudessa olisi tarkoitus nopeuttaa linjaston toimintaa, voisi virtuaalisella mallilla jo etukäteen testata eri nopeuksia ja tehdä valinnaisia PLC-lohkoja eri viivearvoilla ja ohjauksilla eri nopeuksille.

Useassa simuloidussa tapauksessa säästettiin myös taloudelliselta vahingolta, kun käsiteltävänä tuotteena oli virtuaalinen malli todellisen tuotteen sijasta. Testattaessa suurempia liikenopeuksia toiminnoille, pystyttiin havaitsemaan, että tuote ei esimerkiksi ehdi välistä pois ennen luukun sulkeutumista ja puristuu väliin. Ensimmäisten PLC-ohjauksen versioiden kanssa toiminta ei vastannut tavoitteita ja vähintäänkin tuotteet olisivat vaurioituneet. Uusia tuotteita putoaa linjalle noin puolen sekunnin välein ja virheellinen toiminta lopullisessa käyttöönotossa voi tällöin käydä nopeasti kalliiksi. Kaikkien poikkeuksellisten tilanteiden mallintaminen ja tutkiminen virtuaalisesti vähentää riskiä taloudellisia- tai henkilövahinkoja tuottavasta tapaturmasta. Poikkeavia tapahtumia on myös helpompi havaita edellä mainitun hidastetun toiminnan avulla.

Hyöty, joka ei täysin konkretisoitunut tässä projektissa, on konseptien toiminnan puutteellisuuden tai puutteellisuuksien havaitseminen. Otettaessa virtuaalinen käyttöönotto mukaan suunnitteluun mahdollisimman aikaisessa vaiheessa voidaan havaita, mikäli jokin konsepti ei saavuta vaadittuja raja-arvoja, ja täten voidaan ryhtyä toimenpiteisiin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Esimerkiksi todellisten nopeuksien hahmottaminen voi olla vaikeata ennen kuin liikenopeudet oikeasti näkee. Tämä voi johtaa esimerkiksi siihen, että vaikka laitteisto mekaanisesti toimitaisikin täysin suunnitellun mukaisesti, ei jonkin osan liikkeen toistojen määrää tule ajateltua. Tämän yksittäisen osan kestävyyttä toistuvassa kuormituksessa ei välttämättä ole otettu huomioon ja pahimmassa tapauksessa se muuttaa koko konseptin toiminnan. Tässä projektissa havaittiin, että yksi kolmesta konseptista ei toiminut niin luotettavasti kuin kaksi muuta konseptia. Tämä osaltaan johtui myös siitä, että tätä konseptia ei päästy ohjaamaan sille suunnitellulla kiihdytyskäyrällä.

Tämän toteuttaminen olisi vaatinut SIMIT-simulointiohjelmiston asentamisen. Samassa konseptissa pyörintäakselin sijaintia täytyi hieman muuttaa, jotta lavat mahtuivat pyörimään osumatta lajitteluläppään. Tämä muutos oli selkeä mekaaninen vika, joka olisi tullut eteen viimeistään käyttöönotossa, mikäli osien sijoittelu olisi noudattanut tämän hetkisten mallien sijoittelua. Samantapaisia pieniä muutoksia tuli myös muissa konsepteissa, kun liikkeiden havaittiin poikkeavan hieman halutusta. Asiakkaan lähtiessä jatkamaan projektin toteutusta oleelliseksi tulisi myös lopullisen tuotantotilan linjastolle asettamat rajoitteet. Nämä voivat muokata linjaston ominaisuuksia vielä hieman, jolloin virtuaalisella mallilla päästään varmistamaan lopullisen linjaston toiminta ennen näiden muutoksien toteuttamista.

Asiakas päätti siirtää investointipäätöstään myöhemmäksi, mistä syystä todellista vertailua virtuaalisen mallin ja todellisen linjaston toiminnan välillä ei päästy tekemään. Todellisen toiminnan ja virtuaalisen mallin liikkeiden välille jäi yksi epävarmuustekijä. Sillä OPC kommunikaatio aiheuttaa ilmeisesti pienen viiveen PLC:n ja MCD:n välille. Tämä voi aiheuttaa pieniä tarkennuksia viivearvoihin PLC-koodissa sekä lopullisiin anturipaikkoihin. Viiveen tarkkaan arvoon ei päästy käsiksi, mutta kyse on toiminnan kannalta erittäin pienestä viiveestä. Muuttamalla OPC-asiakkaan päivityssykliä sekä PLC:n sykliä voidaan viiveeseen vaikuttaa hieman. Silti tarkka vaikutus jää piiloon. Uudessa TIA Portal versiossa simulointi onnistuu hieman eri tavalla ja tällä voi olla vaikutusta myös MCD:n ja TIA Portalin väliseen kommunikointiin. Viiveeseen voi osaltaan vaikuttaa myös käytössä olleen tietokoneen heikko prosessointiteho. Laskentatehon puute kävi ilmi simuloitaessa mallia normaalinopeudella, jolloin viive todelliseen tilanteeseen kasvoi simuloinnin edetessä. Hitaammilla nopeuksilla simulointi vastasi todellisia nopeuksia reaaliajassa ja toiminta saatiin luotettavaksi. Hitaammat nopeudet vaikuttivat ainoastaan PLC:n avulla toteutettuihin viiveisiin.

MCD:n yksi merkittävä puute on muovautuvien objektien puute. Ohjelmistossa on mahdollista muuttaa kappaleen muotoa ennalta määritetyllä tavalla törmäyksen tai signaalin vaikutuksesta, mutta kappaleita ei saa esimerkiksi taipumaan fysiikan lakien mukaisesti. Tämä ei ole vain MCD:n ongelma, vaan vaatii tällä hetkellä vielä liikaa tehoja tietokoneelta, eikä tästä syystä ole tämän kaltaisissa simuloinneissa mahdollista. Projektista riippuen tämä puute voi aiheuttaa eroavaisuutta todellisen toiminnan ja simuloidun toiminnan välille. Tällöin on syytä pohtia, voiko tai kannattaako virtuaalista käyttöönottoa toteuttaa ollenkaan. Tämä tulee kuitenkin kyseeseen vain niissä projekteissa, joissa objektit ovat muovautuneessa tilassa ns. normaalitilaa huomattavasti enemmän.

## 6.4.2 Muutokset suunnittelutyöhön

Oleellinen kysymys Mechatronics Concept Designerin avulla tehtävän virtuaalisen käyttöönoton tulevaisuudesta Etteplan Oyj:ssä on, miten suunnittelu jaetaan automaatio- ja mekaniikkasuunnittelun välillä? Virtuaalinen käyttöönotto on tarkoitus integroida osaksi normaalia suunnittelukäytäntöä, jolloin 3D-mallinnustyö on tarkoitus edelleen suorittaa



kuten ennenkin, tuotettuja 3D-malleja pyrittäisiin vain hyödyntämään laajemmin. Tavoitellut hyödyt saadaan parhaiten käyttöön, mikäli mekaniikka- ja automaatio suunnittelu tekevät entistä enemmän yhteistyötä aikaisemmissa vaiheissa projektia. Mekaanisten osien mallinnus jäisi edelleen mekaniikkasuunnittelun vastuulle, ja alustavan suunnitelman mukaan MCD:n käyttö tulisi osaksi automaatio suunnittelun toimintoja. Projektikohtaisesti voi tällöin suorittaa arviointia siitä, mikä osuus kannattaa mallintaa ensin ja onko osioita joihin automaatio suunnittelu ei vaikuta. Automaatio suunnittelun kannalta kriittiset osiot voisi yleisesti ottaen mallintaa ensin, jotta automaatio suunnittelija pääsee testaamaan ohjauksen toimintaa mahdollisimman pian.

Kuten luvussa 3.1 tuli jo esille, mitä aiemmassa vaiheessa suunnitteluvirheet tai ongelmat huomataan, sitä pienemmäksi kustannukset jäävät. Toisaalta on myös ymmärrettävä, ettei automaatio suunnittelija aloita simuloinnin toteutusta liian aikaisin ilman kaikkia tarvittavia 3D-malleja ja seiso täten toimettomana. Simulointia on 3D-mallien osalta päästy testaamaan vain Solidworks-mallinnusohjelmistolla tuotetuilla osilla ja kokoonpanoilla, mutta myös moni muu ohjelmisto on yhteensopiva Siemens NX:n kanssa. Pelkästään jo Solidworks-malleja käytettäessä oli pieniä ongelmia käännettäessä mallia NX:n ymmärtämään muotoon. Nämä johtuivat osittain kuitenkin ohjelmistoversioiden yhteensopimattomuudesta, joka korjaantui päivittämällä NX uudempaan versioon. Ohjelmistojen yhteensopivuus voi kuitenkin aiheuttaa paljonkin lisätyötä ja tällöin ongelmana ovat automaatiopuolella ennestään tuntemattomat ohjelmistot. Lisäkuorma kasautuu tällöin helposti mekaniikkasuunnittelun puolelle, joilla on kokemusta vastaavista ongelmista ennestään. On toki mahdollista jakaa jollekin selkeästi vastuu koko virtuaalisen käyttöönoton projekteista. Asiakkaalta saadut mallit ovat vaikea paikka, sillä ei ole täyttä varmuutta miten malli on toteutettu, tällöin kääntämisessä tulevat virheilmoitukset voivat olla aikaa vieviä selvittää. Asiakas voi pahimmassa tapauksessa olla myös haluton jakamaan yksityiskohtaista mallia tuotteistaan, ja voi tällöin piilottaa komponentteja, jolloin mallien avaaminen NX:n puolella voi olla taas vaikeaa.

Mikäli osa MCD:n toiminnallisuuksien mallintamisesta toteutettaisiin kuitenkin mekaanisen suunnittelun toimesta, vaarana on, että yhteistyö mekaniikka- ja automaatio suunnittelun välillä jää nykyiselle tasolle. Tällöin tavoiteltu aiempi integraatio automaatio- ja mekaniikkasuunnittelun välillä ja tästä tavoitellut hyödyt eivät ole yhtä merkittäviä. Toki automaatio suunnittelija, lisätessään ohjauskomponentteja MCD malliin, tulee tarkastelleeksi samalla tavalla laitteen toimintoja. Ongelmakohdan havaitessaan sekä mekaniikka- että automaatio suunnittelija voivat kommunikoida toistensa kanssa aivan samalla tavalla kuin, jos MCD:n käyttö olisi täysin osana automaatio suunnittelijan toimenkuvaa. Itse MCD:n käyttö on varsin yksinkertaista, mutta jos ei omaa mitään aiempaa kokemusta 3D-mallinnusohjelmistojen käytöstä voi alussa tutustumiseen mennä pidemmän aikaa. Suurena hyötynä on, jos Siemens NX-ohjelmisto on ennestään tuttu ja mallinnus sen avulla sujuu luontevasti. Virtuaalisen käyttöönoton hyödyntäminen projekteissa, joissa 3D-malleja ei muuten ole tuotettu, on oma tapauksensa. 3D-mallien toteuttaminen voi

vaatia paljonkin työtä, jolloin virtuaalisesta käyttöönotosta saavutetut hyödyt jäävät pieniksi tai olemattomiksi. Näissä tapauksissa (esimerkiksi projektit, joissa automaatiojärjestelmä päivitetään uuteen) virtuaalisen käyttöönoton laajuus on pohdittava erityisen tarkkaan. On mietittävä millä kaikilla tavoin virtuaalisesta mallista voidaan hyötyä. Yksi vaihtoehto voisi olla kunnossapidon vianhakuun käytetty virtuaalimalli, josta voitaisiin jälkikäteen seurata tapahtumien kulkua todellisten ohjaussignaalien mukaan.

### 6.4.3 Tulevaisuuden toimenpiteet

Tämän tutkimuksen ja tulevan projektin perusteella on päätettävä kuinka laajasti digitaalisen tehtaan ja virtuaalisen kaksosen idea on järkevä ottaa osaksi Etteplanin toimintoja. Lisäksi on mietittävä kuinka suunnittelu pystyttäisiin toteuttamaan siten, että kerättyä dataa voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää uusien projektien suunnitteluvaiheessa tuotettuihin malleihin mahdollisimman tehokkaasti. Asiakkaalla ei välttämättä ole käytössä tietty ohjelmisto, jolla mallia voisi suoraan hyödyntää, kuten se on esimerkiksi Siemensin kokonaisella ohjelmistopakettilla ajateltu. Tällöin virtuaalisissa käyttöönotoissa käytettävät mallit jäisivät Etteplanin haltuun. Edellisen luvun lopussa mainittu tapahtumien toistaminen jälkikäteen olisi tällöin vain Etteplanin käytettävissä.

Investointina Mechatronics Concept Designerin käyttö tulee vaatimaan oman lisenssinsä sekä tähän liittyvät vuosimaksut. Verrattaessa näiden maksujen suuruutta luvussa 4.3.2 esitettyihin tutkimustuloksiin ja simuloinnin tuottamiin säästöihin, ei välttämättä puhuta niin isoista summista ja pitkistä takaisinmaksuajoista. Saavutetut säästöt ovat kuitenkin projektikohtaisia ja ilman konkreettisia tuloksia MCD:n todellisesta käytöstä on niitä todella vaikea arvioida. Työvoimaan ja käytettyyn aikaan investoitaessa on samankaltainen tilanne. Yksi loppuun asti viety projekti olisi oleellista saada toteutettua. Simulointiin käytetty työkuorma riippuu paljon ensimmäisten projektien onnistumisesta, jos asiakailta saadaan hyvää palautetta voi simuloinnin tuottamat hyödyt konkretisoitua nopeastikin. Tehtäessä isohko investointi uuteen ohjelmistoon on oltava ymmärrys kaikkiin sen tarjoamiin toimintoihin ja pyrittävä myös hyödyntämään niitä parhaalla mahdollisella tavalla. Tähän vaaditaan koulutusta, jotta ohjelmiston suunniteltu käyttötapa ja koko potentiaali on käytettävissä.

Yksi selkeä puute MCD:ssä on epälineaaristen kiihdytysten ja hidastusten puuttuminen. Servokäyttöjen tarkka mallintaminen vaatii näiden simuloimista. Tähän on olemassa oma lisäosansa, Siemens SIMIT, jolla yksittäisen komponentin mallinnus onnistuu. Mikäli tulossa oleva projekti päästään toteuttamaan ja SIMIT kommunikointi simulointimallin kanssa päästään testaamaan, saadaan tästä huomattavasti enemmän informaatiota. SIMIT on laajalti käytössä oleva ohjelmisto ja sen toiminnoista löytyy paljon materiaalia, mikä omalta osaltaan tukee sen hankintaa. Tällä hetkellä SIMIT:n testaukseen liittyvä projekti ei ole vielä toteutusvaiheessa, joten konkreettisia tuloksia simuloinnista SIMIT:n kanssa ei ole.

Jotta virtuaalimallia pystyttäisiin hyödyntämään monipuolisemmin, olisi yksi mahdollisuus toistaa tallennettuja ongelmatilanteita jälkikäteen. Tämä onnistuisi esimerkiksi tallentamalla historiadataa OPC HDA-asiakkaan avulla. OPC HDA-asiakkaan tietokantaan tallennettaisiin jokaisen tunnisteen tiedot ja ajanhetki. Ongelmaksi voisi kuitenkin muodostua datan suuri määrä, jolloin historiadataa ei voisi tallentaa pitkältä ajanjaksolta sekä vaaditut OPC HDA-palvelin ja -asiakas. Voiko MCD toimia sekä OPC DA-asiakkaana että OPC HDA-asiakkaana. Toinen tässä vielä epäselvä ongelmakeho on MCD:n simuloinnin aikana liikuteltavien objektien paikoitus. Aloitettaessa simulointi ovat nämä objektit aina samassa paikassa tai niiden luonti tapahtuu signaalin avulla. Tämä johtaa historiadan simuloinnissa siihen, että simulointi olisi aloitettava tarpeeksi aikaisin, jotta objektit ovat luotu oikeaan aikaan ja ovat todellisessa paikassa. Ilman objekteja simulointimallista kylläkin onnistuisi nähdä, mikäli jokin liike ei tapahdu tai jää puutteelliseksi, joten sinällään pelkkään vianhakuun objektien luonnin mukaan ottaminen ei ole välttämätöntä. Toinen mahdollinen hyödyntämiskohde historiatalle on uuden henkilöstön koulutus. Virtuaalisesta mallista saa huomattavasti paremmin käsityksen siitä, mikä voi mennä vikaan ja mitä tällöin voi tapahtua.

## 7. YHTEENVETO

Suunnitteluprojektin kriittinen vaihe kustannusten kannalta on projektin alku, jossa määritetään mitä suunniteltavalta laitteistolta vaaditaan. Toinen tärkeä vaihe on käyttöönotto, jossa todellinen toiminta päästään toteamaan. Mahdolliset virheet havaitaan usein vasta tällöin, kun toimintaa on mahdollista testata. Virheiden aiheuttamat kustannukset kertyvät suhteessa siihen, mitä myöhemmin ne havaitaan. Tästä syystä on siis oleellista kehittää suunnitteluprojektin alkuvaiheita siten, että mahdolliset virheet havaittaisiin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Simulaatioiden avulla pyritään tuottamaan enemmän informaatiota etenkin suunnittelun alkuvaiheisiin, joissa todellisen laitteiston hahmottaminen voi olla vaikeata.

Tämän työn tavoitteena oli toteuttaa virtuaalinen käyttöönotto Etteplan Oyj:n suunnitteluprojektiin sekä tutkia millaisia vaikutuksia virtuaalisen käyttöönoton ja simuloinnin integroimisella suunnittelukäytäntöön voidaan saavuttaa. Työ liitettiin heti toteutuksen alusta toteutusvaiheessa olevaan asiakasprojektiin, jonka osana virtuaalista käyttöönottoa testattiin. Työssä tutkittiin edellä mainittuja suunnitteluprojektin kriittisiä vaiheita ja niihin liittyviä ongelmia ja havaittiin suunnittelun muuttuvan perinteisestä hieman virtuaalista käyttöönottoa hyödynnettäessä. Sillä tuotettua ohjelmakoodia päästään heti testaamaan, jolloin virheet havaitaan nopeammin ja etenkin yksi kerrallaan. Tällöin on helpompi korjata havaittu virhe heti sen havaitsemisen jälkeen. Myös tapahtumien toistettavuus vaikuttaa myönteisesti virheiden havaitsemiseen ja korjaamiseen. Useista eri tutkimustuloksista kävi ilmi, että simuloinnista suunnittelun tukena sekä virtuaali- ja hybridi-käyttöönotoista on saavutettavissa selkeitä säästöjä edellä mainittujen hyötyjen lisäksi. Fyysisten prototyyppien määrää voidaan vähentää ja täten energia- sekä materiaalikustannukset pienenevät. Virtuaalisen käyttöönoton avulla paljon testauksista voidaan toteuttaa jo toimistolla, jolloin lopullisen tuotantolaitoksen työmaalla vietetty aika vähenee.

Työssä tuotettiin virtuaalisen käyttöönoton mahdollistava virtuaalinen malli mahdollisesti tulevaisuudessa käyttöönotettavasta lajittelulinjasta. Tämän virtuaalisen mallin avulla esiteltiin asiakkaalle konseptien toimintaa helposti ja ilman suuria investointeja. Kaikki kolme eri konseptia pystyttiin esittelemään, näistä yhdessä havaittiin pieniä puutteita. Ennen mitään päätöstä siitä, millä konseptilla linjan toteutusta jatketaan, saatiin virtuaalista FAT:a vastaava alustava esittely asiakkaan kanssa tehtyä ja palautetta näistä ratkaisuksista. Asiakas koki, että aiempiin kokemuksiinsa ja toteutettuihin linjoihin verrattaessa virtuaalinen malli käyttäytyy hyvin vastaavalla tavalla ja tämän perusteella asiakas on luottavainen saavutettuihin tuloksiin. Asiakkaan hankinta- ja toteutuspäätös siirtyvät myöhemmäksi ja todelliseen toimintaan vertailtavissa olevia tuloksia ei saatu vielä tässä vaiheessa.

## LÄHTEET

- [1] Etteplan Oyj, Vuosikertomus 2015, 113 s., Saatavissa (viitattu 12.8.2016): [http://www.etteplan.com/investors/annual-and-interim-reports/2016.aspx?sc\\_lang=fi-FI](http://www.etteplan.com/investors/annual-and-interim-reports/2016.aspx?sc_lang=fi-FI).
- [2] M. Mihelj, D. Novak, S. Beguš, Virtual Reality Technology and Applications, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, Volume 68, Springer, Dordrecht, 2014, 236 p.
- [3] M. Grieves, Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management, Space Coast Press, Marraskuu 2011, 370 p.
- [4] H. Raunio, Teollisuus 4.0 - "Suomen oltava kilpailukykyinen vaihtoehto, kun teollisuuden paluumuutto Aasiasta Eurooppaan alkaa", Tekniikka ja talous, Syyskuu 2014, Saatavilla (Viitattu 12.8.2016): <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/2014-09-27/Teollisuus-4.0---Suomen-oltava-kilpailukykyinen-vaihtoehto-kun-teollisuuden-paluumuutto-Aasiasta-Eurooppaan-alkaa-3255926.html>.
- [5] Siemens Suomi, Ralf-Michael Franke: Tekniset ratkaisut 4.0 -vision toteuttamiseksi ovat olemassa, Saatavilla (Viitattu 12.8.2016): [http://www.siemens.fi/fi/media/digital\\_enterprise.htm](http://www.siemens.fi/fi/media/digital_enterprise.htm).
- [6] P. Suvanto, Teollisuus 4.0 on pian täällä, Reset-lehti, Helmikuu 2014, Saatavilla (Viitattu 12.8.2016): <http://reset-lehti.fi/teollisuus-4-0-pian-taalla/>
- [7] F. W. Arndt, The Digital Factory: Planning and simulation of production in automotive industry, Informatics in Control, Automation and Robotics I, Springer 2006, pp. 27-29.
- [8] H. Ou, T. Zou, The Application of Digital Factory in domestic chemical industry, The 27th Chinese Control and Decision Conference, 2015, pp. 4305-4308.
- [9] Z. Liu, N. Suchold, C. Diedrich, Virtual Commissioning of Automated Systems, Automation: Luku 7, InTech Open, Heinäkuu 2012, pp. 131-148.
- [10] M. Grieves, Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, Digital Twin Whitepaper, 2014, 8 p.
- [11] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, K. D. Bettenhausen, About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing, IFAC Papers Online 48, 2015, pp. 567-572.

- [12] M. Oppelt, L. Urbas, Integrated Virtual Commissioning an essential Activity in the Automation Engineering Process: From virtual commissioning to simulation supported engineering, IECON- 40th Annual Conference, 2014, pp. 2564-2570.
- [13] iSILOG, Mit Sicherheit die richtige Entscheidung, 16 p., Saatavissa (Viitattu 14.6.2016): [www.community.plm.automation.siemens.com/siemensplm/attachments/siemensplm/NXDesignForum/1149/1/isilog\\_mcd\\_simit\\_eng\\_short.pdf](http://www.community.plm.automation.siemens.com/siemensplm/attachments/siemensplm/NXDesignForum/1149/1/isilog_mcd_simit_eng_short.pdf).
- [14] R. H. Bishop, Mechatronics: An Introduction, CRC Press, Syyskuu 2005, 312 p.
- [15] M. Boucher, D. Houlihan, Engineering Evolved: Getting Mechatronics Performance Right the First Time, Aberdeen Group, Marraskuu 2008, 32 p.
- [16] K. G. Shin, P. Ramanathan, Real-Time Computing: A New Discipline of Computer Science and Engineering, Proceedings of the IEEE, Issue 82, No. 1, Tammi 1994, pp. 6-24.
- [17] S. Makris, G. Michalos and G. Chryssolouris, Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots. Advances in Decision Science, Issue 2012, 11 p.
- [18] M. A. A. Sanvido, Hardware-in-the-loop simulation Framework, PhD, Automatic Control Laboratory, ETH Zürich, Maaliskuu 2002, 110 p.
- [19] M. Groothuis, Distributed HIL simulation for Boderc, Diplomityö, Twenten yliopisto, Elokuu 2004, 124 p.
- [20] S. Dominka, F. Schiller, S. Kain, Hybrid Commissioning: from hardware-in-the-loop simulation to real production plants, Proceedings of the 18th conference on Proceedings of the 18th IASTED International Conference: modelling and simulation, Toukokuu 2007, 5 p.
- [21] S. Kain, F. Schiller, S. Dominka, Methodology for Reusing Real-time HiL Simulation Models in the Commissioning and Operation Phase of Industrial Production Plants, in: G. Naik, (ed.), Intelligent Mechatronics, InTech Open, Helmikuu 2011, 27 s.
- [22] J. Stark, Product Lifecycle Management: 21st Century Paradigm for Product Realisation, Springer-Verlag Lontoo, 2011, 562 p.
- [23] E. J. Sankar, ME 6501 Computer Aided Design, A.R Engineering College, Saatavissa (Viitattu: 2.8.2016): <http://slideplayer.com/slide/7805553>.

- [24] N. Wognum, R. Curran, Current Concurrency in Practice, in: J. Stjepandić, G. Rock, C. Bil, (ed.), Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment, Proceedings of the 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Springer-Verlag, 2013, pp. 3-14.
- [25] S. Fukuda, Concurrent Engineering in a New Perspective: Heading for Seamless Engineering, in: J. Stjepandić, G. Rock, C. Bil, (ed.), Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment, Proceedings of the 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Springer-Verlag, 2013, pp. 15-26.
- [26] C. Runde, F. Girbacia, E. Butila, Virtual & Augmented Environments for Concurrent Engineering – Concurrent Virtual Engineering, in: J. Stjepandić, G. Rock, C. Bil, (ed.), Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment, Proceedings of the 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Springer-Verlag, 2013, pp. 849-860.
- [27] Aberdeen Group, Best Practices for Migrating from 2D to 3D CAD, Toukokuu 2008, 35 p.
- [28] M. Fucci, The Evolution of Digital Tools for Product Design, in: M. Bordegoni, C. Rizzi, (ed.), Innovation in Product Design: From CAD to Virtual Prototyping, Springer, 2011, pp. 1-14.
- [29] P. Cervellera, The Evolving Role of Computer-Aided Engineering: A Case Study in the Aeronautical Structural Design, in: M. Bordegoni, C. Rizzi, (ed.), Innovation in Product Design: From CAD to Virtual Prototyping, Springer, 2011, pp. 97-116.
- [30] Siemens, Siemens NX 10 claims enhanced design flexibility and up to 3X higher productivity, PACE 2014, Saatavissa (Viitattu 15.7.2016): <http://search.proquest.com/docview/1619011407?accountid=27303>
- [31] Siemens, Mechatronics Concept Designer – A functional approach to machine design, 2 p., Saatavissa (Viitattu 1.7.2016): [www.siemens.com/plm/mcd](http://www.siemens.com/plm/mcd).
- [32] iSILOG GmbH, Product flier for NX-Mechatronics Concept Designer, 2 p., Saatavissa (Viitattu 2.7.2016): [www.mechatronics-concept-designer.com](http://www.mechatronics-concept-designer.com).
- [33] A. Strahilov, F. Damrath, Simulation of the behavior of pneumatic drives for virtual commissioning of automated assembly systems, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Issue 36, Joulukuu 2015, s. 101-108.

- [34] J. Lange, F. Iwanitz, OPC – Openness, Productivity and Connectivity, Integration Technologies for Industrial Automated Systems: Luku 5, 2006, 30 p.
- [35] W. Mahnke, M. Damm, S. Leitner, OPC Unified Architecture, Springer- Verlag, 2009, 339 p.
- [36] B. R. Mehta, Y. J. Reddy, OPC Communications, Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation, Luku 15, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2015, s. 459 – 477.



## LIITE A: MECHATRONICS CONCEPT DESIGN WORKFLOW

The following represents a typical machine design workflow using Mechatronics Concept Designer:

1. Define and manage design requirements.
  - Gather and structure requirements such as system response time and cost.
  - Add secondary requirements derived from the main requirements.
  - Link requirements to each other.
  - Add more details to the requirements using embedded tools like Microsoft Word.
2. Create a functional model.
  - Define basic functions of the system.
  - Create a hierarchy based on a functional decomposition.
  - Create and maintain alternatives for the functional design.
  - Reuse functional units.
  - Parameterize the output of functions and associate them with requirements.
3. Create a logical model.
  - Define the basic logical model of the system.
  - Create a hierarchy based on a logical decomposition.
  - Reuse logical blocks.
  - Parameterize the blocks and associate them with functions.
4. Create trancelinks to show the dependencies between functional units and the logical blocks.
5. Define the mechanical concept.
  - Define a rough 3D outline of the basic machine.
  - Assign mechanical objects to functional units and logical blocks.
  - Add kinematics and dynamics.
6. Add basic physics and signals.
  - Add basic physics and speed constraint and position constraint actuators.
  - Add signal adaptors.
  - Assign signal adaptor object to functional units and logical blocks.
7. Define time based operations.
  - Define how the actuators are controlled by operations.
  - Arrange the sequence of operation with a time based notion.
  - Assign operations to the corresponding functions in the function tree.
  - Assign operations to the corresponding logics in the logical tree.
8. Add sensors.
  - Add sensors that are triggered by collisions of system elements with sensor objects, or sensors that are defined by a signal adapter.
9. Define event based operations.
  - Define operations that are triggered by events that are generated by sensors or other objects in the mechatronics systems, such as the position of an actuator.
  - Assign operations to the corresponding functions in the function tree.
10. Replace concept model with detailed model and transfer physics objects from the rough geometries to the detailed ones.
11. Align sensors and actuators with ECAD.

12. Export sequence of operation in PLCOpen XML format to a PLC engineering tool like STEP 7.
13. Test PLC program via OPC connection.

## **LIITE B: OTE ETTEPLAN OYJ:N SUUNNITTELUPROJEKTIOHJEISTUKSESTA**

### 1. SUUNNITTELUPROJEKTI

#### 1.4 Toimintatapa

##### 1.4.2 Aloituskokous

Sopimusneuvottelussa asiakkaan kanssa projektipäällikkö kartoittaa tulevan toimeksiannon mahdollisimman tarkkaan. Suunnittelun aloituskokouksessa selvitetään seuraavat kohdat:

- \* suunnittelutyön määrittely ja laajuus
- \* suunnittelutyön aikataulu
- \* kokoukset ja katselmukset projektin aikana
- \* raportointi
- \* suunnittelukatselmukset ja tarkastuspisteet
- \* projektipäiväkirjan pito
- \* muutosten hallinta
- \* toteutuksien yksityiskohdat
- \* käytettävät komponentit
- \* dokumentointi ja piirustusnumerointi
- \* suunnitteluryhmän henkilöt
- \* piirustuksien laatu ja lomakkeet
- \* käytettävät CAD järjestelmät ja -asetusarvot
- \* salassapitosopimukset
- \* mahdolliset mallipiirustukset
- \* mahdolliset malliohjeet
- \* viranomaismenettely
- \* käytettävät standardit
- \* käytettävät työnumerot
- \* asiakkaan ja muiden projektiin osallistuvien tahojen yhteyshenkilö(t) ja yhteystiedot

Lisäksi tarpeen mukaan tulisi pohtia ympäristöasioiden huomioimista kuten:

- \* riskien minimointi
- \* raaka-aineiden valinta
- \* luonnonvarojen kulutuksen pienentäminen
- \* energian käyttö
- \* elinkaariajattelu

Edellä mainitut kohdat soveltuvien osin sekä muut kokouksessa selvitetty ja esille tulleet kohdat kirjataan muistioon, joka sovittaessa jaetaan mukana olleille henkilöille.

#### 1.4.3 Projektin aloitus

Projektipäällikkö tiedottaa kaikille projektiin osallistuville henkilöille asiat, jotka on sovittu asiakkaan kanssa ja jotka koskevat suunnittelijaa, kuten tekninen erittely, käytettävät standardit, tavoitteiden tarkastuspisteet, mallipiirustukset, työnumerot ja aikataulut. Samalla hän jakaa tarvittaessa työn osa-alueisiin eri suunnittelijoille sekä valitsee kuhunkin osa-alueeseen vastaavan suunnittelijan.

#### 1.4.4 Projektin toteutus

Laitteen tai laitteiston suunnittelusta vastaa suunnittelija yhteistyössä asiakkaan ja toimiston vastuuhenkilöiden kanssa. Usean suunnittelijan ollessa kyseessä hoitaa yhteydet asiakkaaseen projektipäällikkö. Suunnittelijan on tarkastettava laitteen tai laitteiston päämittojen, lujuuslaskelmien, raaka-aineiden saannin sekä valmistusteknisten mahdollisuuksien lisäksi suorituskyky, ympäristökijät, huollettavuus, turvallisuus, kestävyys sekä toimintavarmuus säännöllisesti suunnittelun edetessä. Lisäksi suunnittelijan on varmistettava projektissa tarvittavien standardien saatavuus ja ajantasaisuus. Mikäli tarvittavaa ja voimassa olevaa standardia ei löydy, tulee se esimiehen luvalla tilata. Uusista lay-outeista ja teknisistä ratkaisuksista pyydetään asiakkaan hyväksyntä.

#### 1.4.5 Muutosten hallinta

Projektipäällikkö neuvottelee, hyväksyy ja kirjaa kaikki, myös suunnittelijoiden ehdottamat muutokset, joita projektin aikana tulee.

Asiakkaan suunnittelijalle ehdottamista muutoksista on aina ilmoitettava projektipäällikölle. Hän tarkastaa vaikutukset aikatauluun ja kustannuksiin ja kertoo näistä asiakkaalle sekä muille tarvittaville henkilöille. Tulosyksikön päällikkö ja projektipäällikkö hyväksyttävät asiakkaalla muutokset ja niiden aiheuttamat vaikutukset kustannuksiin ja aikatauluun välittömästi muutosten tultua ilmi. Tästä tehdään muistio, joka lähetetään asiakkaalle.

Pienet muutokset käsitellään projektin seurantalavereissa.

#### 1.4.7 Suunnittelukatselmus

Aloituskokouksessa sovittujen suunnittelukatselmuksien kutsujana on projektipäällikkö. Hän kutsuu suunnittelukatselmuksiin tarpeelliseksi katsomansa henkilöt. Suunnittelukatselmuksessa kartoitetaan projektin sen hetkinen tilanne. Mahdollisten puutteellisuuden esiin tullessa aloitetaan toimenpiteet asiakkaan ja

omien tavoitteiden saavuttamiseksi. Suunnittelukatselmuksista on laadittava muistio, jonka jakelun projektipäällikkö päättää tapauskohtaisesti. Yhden henkilön suunnitteluprojekteissa pidetään suunnittelukatselmus neuvotellen asiakkaan kanssa. Suunnittelukatselmuksesta laaditaan muistio. Viimeisessä suunnittelukatselmuksessa todetaan, että työn tulokset täyttävät annettujen lähtöarvojen vaatimukset.

#### 1.4.9 Projektin lopetus

Projektin loputtua luovutetaan asiakkaalle hänen hyväksymänsä työ sekä käytössä ollut materiaali sopimuksen mukaan. Projektipäällikkö täyttää projektipäätelomakkeen ja antaa siitä kopion tulostusyksikön päällikölle. Projektipäällikkö tekee suurista ja tärkeistä projekteista referenssikuvauksen. Asiakkaan päätelomake kerätään tähän liittyvän toimintaohjeen mukaan.